INVESTIGACION y CIENCIA

EL SONIDO DE LOS ARENALES

ASI ERAN LOS PRIMEROS ORDENADORES

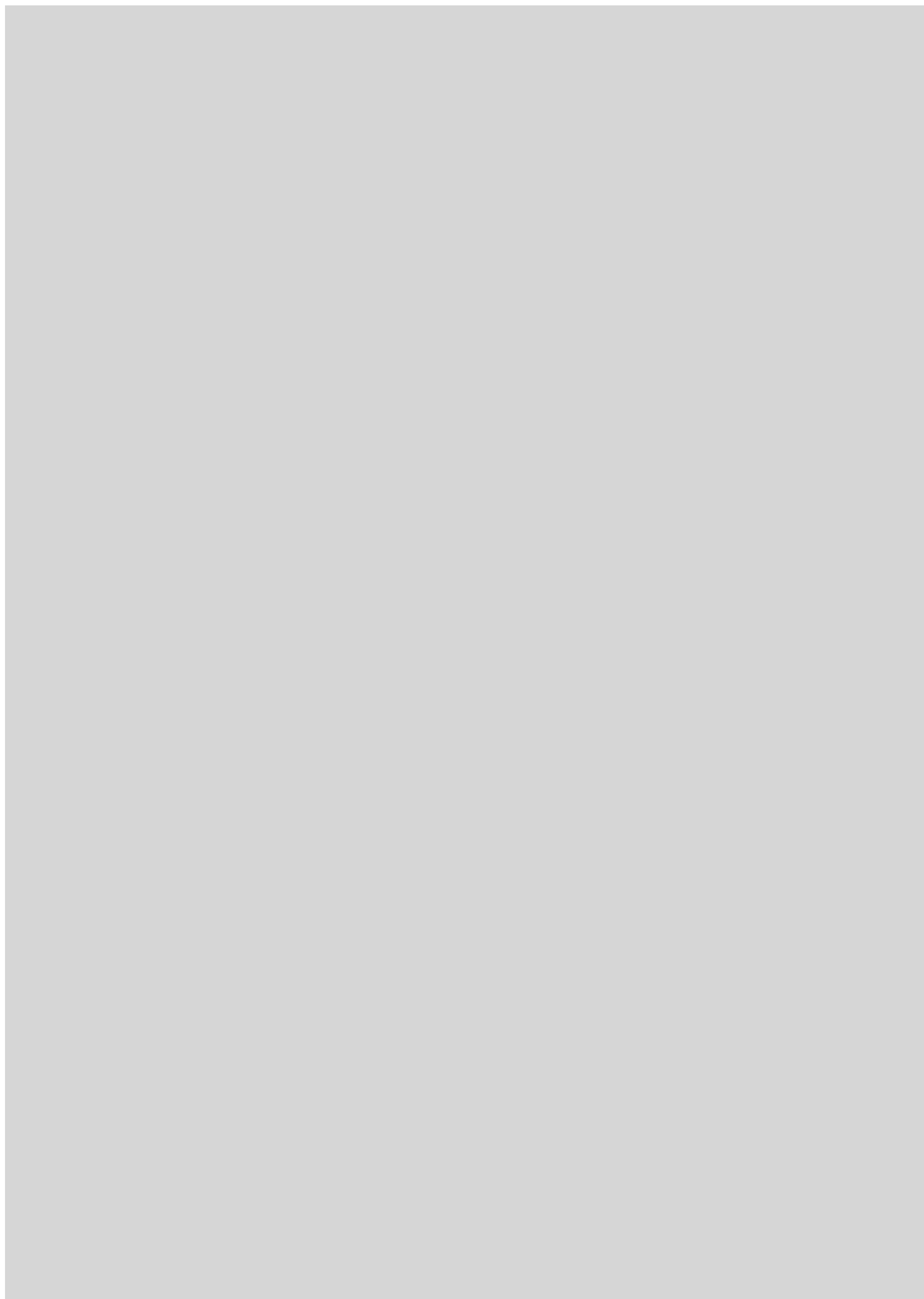
NUEVAS ARMAS CONTRA EL SIDA

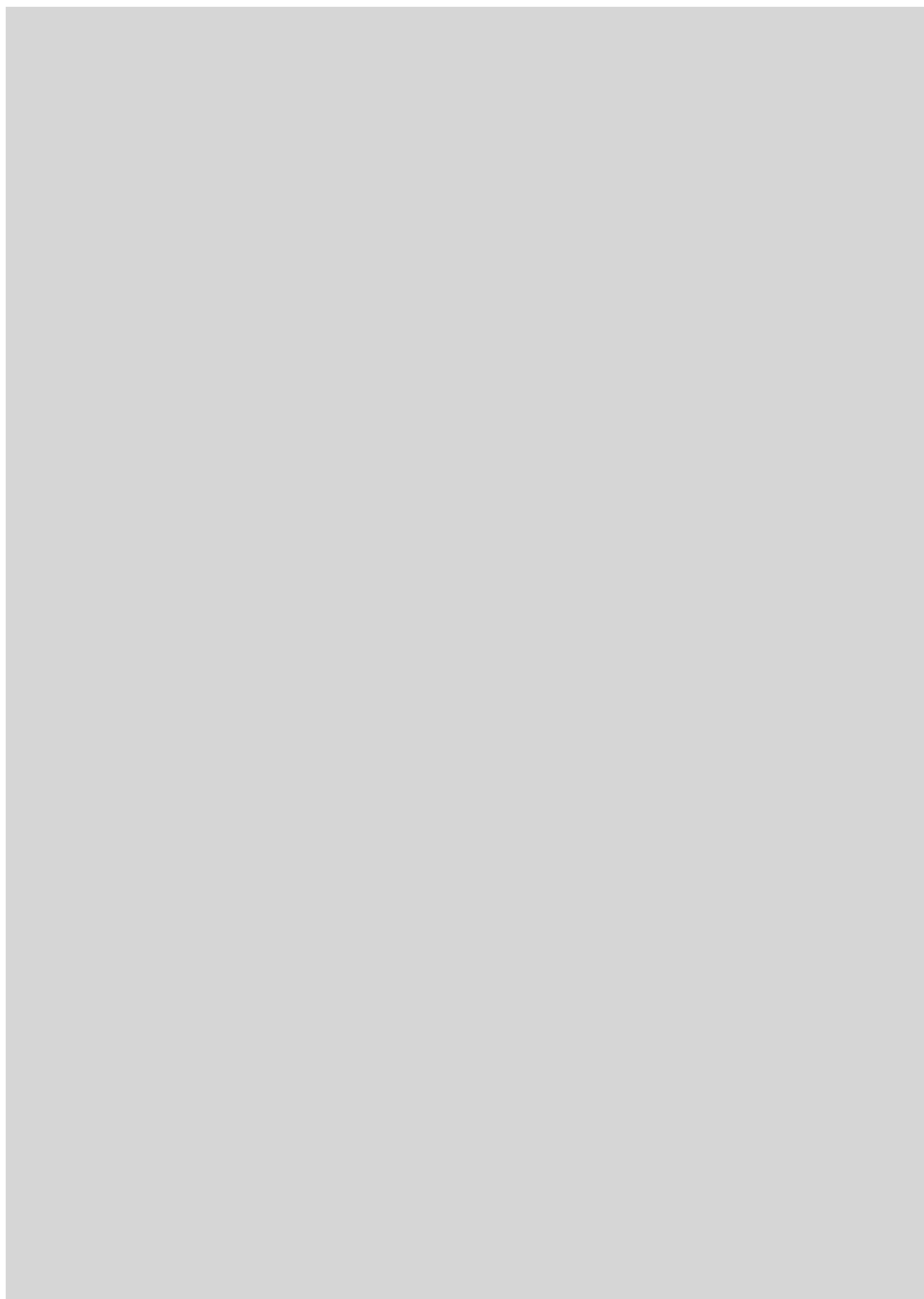
Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

DESCUBRIMIENTO DEL QUARK CIMA



DICIEMBRE 1997
800 PTAS.

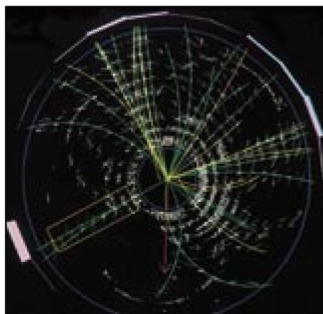




INVESTIGACION y CIENCIA

Diciembre de 1997 Número 255

SECCIONES



Portada: Laboratorio Nacional del Acelerador Fermi

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Página	Fuente
6-8	Roberto Osti
9-11	Laurie Grace
12	NIBS/SPL *Photo Researchers, Inc.*
13	Bernd Auers
16-17	Michael Goodman
18	Laboratorio Nacional del Acelerador Fermi
19	Jennifer C. Christiansen
20	Laboratorio Nacional del Acelerador Fermi
21	Physical Review Letters
22-23	Deutsches Technikmuseum Berlin
25	Raúl Rojas/Spektrum der Wissenschaft (*arriba*), Spektrum der Wissenschaft (*abajo*)
26-27	Markus Finsterwald/SdW
28-29	Raúl Rojas/SdW
44-45	Stephen Dalton, *Animals Animals* (*arriba*)*;* Rachel Taylor (*abajo*)
46-47	Tomo Narashima
48-49	Michael E. Smith y Tomo Narashima
50-51	Johnny Johnson
52-53	Tomo Narashima
54-62	Jesús Buitrago y Evencio Mediavilla
65	Jim Brandenburg, *Minden Pictures*
66-67	Cortesía de Michael Bretz, Terrence Moore, Laurie Grace (*mapa*), Laurel Rogers (*gráficas*), Douglas Waugh, *Peter Arnold, Inc*., Jim Brandenburg, *Minden Pictures*
68-69	Laurie Grace; fotografías de Terrence Moore (*arriba*); Cortesía de Franco Nori, Paul Sholtz y Michael Bretz (*abajo, izda.*)
70-71	Alfred T. Kamajian
72-73	J. Eric Gouaux, Universidad de Columbia (*arriba, izquierda*), Alfred T. Kamajian (*derecha*); Jie Yang, Universidad de Vermont (*abajo, a*); Sucharit Bhakdi, Universidad de Mainz (*b*) y Uwe Sleytr, Universidad de Ciencias Agrarias de Viena (*c*)
74-75	Alfred T. Kamajian
76-77	Bryan Christie
78-80	Laurel Rogers

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Santiago Torres: *Genes que oponen resistencia al sida*; Juan Pedro Campos: *El descubrimiento del quark cima*; Raúl Rojas: *Los ordenadores de Konrad Zuse*; Joandomènec Ros: *Correr sobre las aguas*; José Manuel García de la Mora: *Vida provinciana en el imperio azteca*; Sònia Ambrós: *Los sonidos de la arena*; Angel Garcimartín: *Perfiles*; J. Vilardell: *Hace..., Taller y laboratorio* e *Ideas aplicadas*; Luis Bou: *Juegos matemáticos*; José Mª Valderas Martínez*: Nexos.*

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL Francisco Gracia Guillén
EDICIONES José María Valderas, *director*
ADMINISTRACIÓN Pilar Bronchal, *directora*
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Bernat Peso Infante
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
EDITA Prensa Científica, S. A. Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona (España)
Teléfono (93) 414 33 44 Telefax (93) 414 54 13

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF John Rennie
BOARD OF EDITORS Michelle Press, *Managing Editor*; Philip M. Yam, *News Editor*; Ricki L. Rusting, Timothy M. Beardsley y Gary Stix, *Associate Editors*; Corey S. Powell, *Electronic Features Editor*; W. Wayt Gibbs; Kristin Leutwyler; Madhusree Mukerjee; Sasha Nemecek; David A. Schneider; Glenn Zorpette
Marguerite Holloway y Paul Wallich, *Contributing Editors*
PRODUCTION Richard Sasso
PUBLISHER Joachim P. Rosler
CHAIRMAN AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER John J. Hanley

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono (93) 414 33 44
Fax (93) 414 54 13

Precios de suscripción, en pesetas:

	Un año	Dos años
España	8.800	16.000
Extranjero	11.000	20.400

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 800 pesetas
Extraordinario: 1.000 pesetas

—Todos los precios indicados incluyen el IVA, cuando es aplicable.

—En Canarias, Ceuta y Melilla los precios incluyen el transporte aéreo.

—El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

DISTRIBUCION

para España:

MIDESA
Carretera de Irún, km. 13,350
(Variante de Fuencarral)
28049 Madrid Tel. (91) 662 10 00

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona
Teléfono (93) 414 33 44

PUBLICIDAD

GM Publicidad
Francisca Martínez Soriano
Menorca, 8, semisótano, centro, izquierda.
28009 Madrid
Tel. (91) 409 70 45 – Fax (91) 409 70 46

Cataluña y Baleares:
Miguel Munill
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona
Tel. (93) 321 21
Fax (93) 414 54 13

Difusión controlada

ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Filmación y fotocromos reproducidos por Dos Digital, Zamora, 46-48, 6ª planta, 3ª puerta - 08005 Barcelona
Imprime Rotocayfo, S.A. Ctra. de Caldes, km 3 - Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

HACE...

...cincuenta años

NUEVA FOTOGRAFÍA TRIDIMENSIONAL. «Un nuevo tipo de vidrio, que contiene en su masa partículas metálicas microscópicas, posee fotosensibilidad al ultravioleta y ofrece nuevas posibilidades como material fotográfico. Las imágenes se forman en color y en tres dimensiones exponiendo el vidrio a luz ultravioleta a través de un negativo. Para revelar la imagen, el vidrio impresionado se somete a una temperatura de unos 540 °C. Una vez revelada, la imagen es sumamente estable y está exenta de la granulosidad que se encuentra en algunas emulsiones de plata.»

ELECTRÓNICA ROBUSTA. «Cuando un circuito electrónico delicado se somete a las más violentas sacudidas y vibraciones, a una humedad densa y a atmósferas corrosivas, el problema de la estabilización adquiere unas dimensiones tremendas. Buscando una solución, la Oficina Nacional de Pesas y Medidas (NBS) empezó con la técnica de incrustar, o "encapsular", en plástico circuitos electrónicos completos, a cuyo fin desarrolló una nueva resina. Con el nombre de Resina de Moldeo NBS, ese nuevo material reduce al mínimo las fugas eléctricas y no se contrae al solidificarse.»

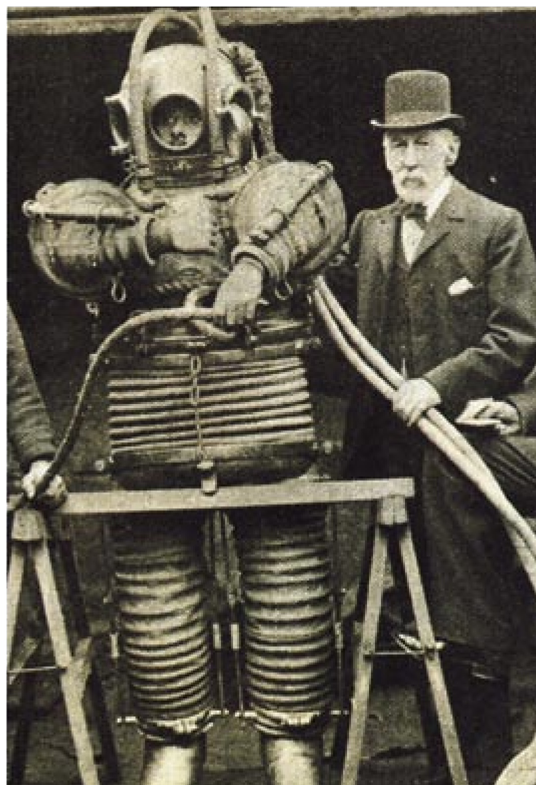
...cien años

DARWIN, OTRA VEZ ACERTADO. «La expedición científica enviada a las islas Ellice por la Sociedad Geográfica de Sydney ha confirmado la teoría de Darwin acerca de la formación de las islas de coral [que los arrecifes se crearon a lo largo de eras geológicas por la deposición de pólipos en capas sucesivas sobre masas terrestres]. Se informa desde Samoa que la barrena de diamante penetró 170 metros en el coral sin tocar fondo. A partir de los 150 metros los resultados prestan un sólido apoyo a la teoría de Darwin, aunque el juicio definitivo depende del examen microscópico de los testigos de sondeo.»

INICIADORES DE LA PSICOLOGÍA. «El profesor Alfred Binet, famoso psicólogo francés, advierte que 'aunque los métodos empleados para medir la memoria acaso pudieron ser toscos, como aún lo son, constituye un gran avance el que seamos capaces de introducir la noción de medida en este problema. Hasta ahora, sólo se ha intentado medir una clase de memoria: la facultad de adquisición. Los experimentos versan sobre el número de imágenes de memoria que pueden acumularse en una prueba.' Un adulto medio con formación retiene siete imágenes; un niño de diez años retiene sólo seis.» [*Nota de la Redacción: Los trabajos de Binet le llevaron a desarrollar el primer test de inteligencia*.]

OSTRAS FALSAS. «En París las ostras de verdad son caras. Por eso se han inventado las ostras artificiales de media concha, que se venden a veinte centavos la docena, y tan hábilmente fabricadas para ofrecer un aspecto atractivo y de frescura que, tras haberles añadido limón o vinagre, no se distinguen de las auténticas. Lo único genuino de esas ostras es la concha, que los fabricantes compran baratas de segunda mano y a las que adhieren las falsas con una pasta insípida.»

BAJO EL MAR. «Presentamos la fotografía de un revestimiento de inmersión en la nueva escafandra Buchanan-Gordon. Los dueños de la patente, tras el éxito de su empleo en Australia, donde la escafandra se usa en el trabajo de las pesquerías de perlas, llevaron dos de ellas a Londres. En el proyecto de la escafandra actual recibieron toda clase de ayuda de la afamada firma de ingenieros submarinos Siebe, Gorman & Company. El casco, que desciende hasta la cintura en una sola pieza de cobre macizo, pesa 115 kilogramos, por 230 que pesa el atavío; permite al buzo respirar a la presión atmosférica normal. El traje porta un teléfono conectado a la superficie.»



Novedoso indumento para buceo de profundidad

...ciento cincuenta años

LIMPIAHUMOS. «Se lee en *The Pittsburg Gazette*: Blackstock & Co. han efectuado las pruebas de un aparato antihumos en su Factoría Algodonera de Allegancy. El experimento ha sido un éxito. Mientras que las chimeneas de las fábricas circundantes lanzaban unas nubes de humo que oscurecían uno de los días más agradables que hemos visto del veranillo de san Martín, el Antihumos de la factoría algodonera agotaba todo el humo que como lluvia caía a nuestro alrededor desde otros puntos.»

CIENCIA ANTIGUA. «Un carruaje de cuatro ruedas con adornos marrones y aros de hierro se acaba de desenterrar en un edificio de tres pisos excavado en Pompeya. Es nuestra opinión que cuando el Imperio Romano fue destrozado por los godos, los romanos tenían una civilización casi tan avanzada como la nuestra actual.»

Genes que oponen resistencia al sida

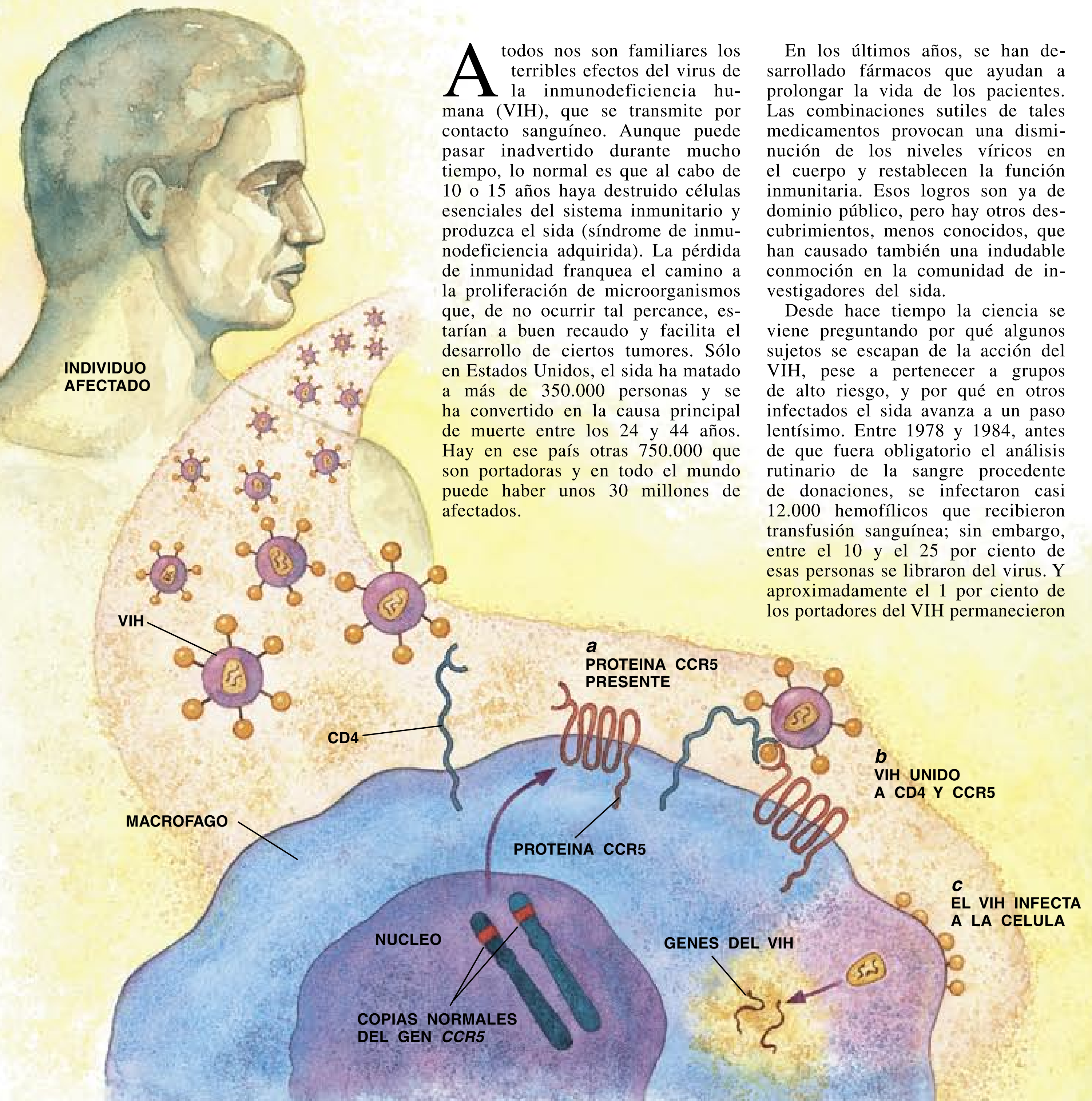
Se conoce ya un carácter genético que protege del sida. Muy pronto podrían aparecer más, abriendo con ello nuevas posibilidades de tratamientos preventivos

Stephen J. O'Brien y Michael Dean

A todos nos son familiares los terribles efectos del virus de la inmunodeficiencia humana (VIH), que se transmite por contacto sanguíneo. Aunque puede pasar inadvertido durante mucho tiempo, lo normal es que al cabo de 10 o 15 años haya destruido células esenciales del sistema inmunitario y produzca el sida (síndrome de inmunodeficiencia adquirida). La pérdida de inmunidad franquea el camino a la proliferación de microorganismos que, de no ocurrir tal percance, estarían a buen recaudo y facilita el desarrollo de ciertos tumores. Sólo en Estados Unidos, el sida ha matado a más de 350.000 personas y se ha convertido en la causa principal de muerte entre los 24 y 44 años. Hay en ese país otras 750.000 que son portadoras y en todo el mundo puede haber unos 30 millones de afectados.

En los últimos años, se han desarrollado fármacos que ayudan a prolongar la vida de los pacientes. Las combinaciones sutiles de tales medicamentos provocan una disminución de los niveles víricos en el cuerpo y restablecen la función inmunitaria. Esos logros son ya de dominio público, pero hay otros descubrimientos, menos conocidos, que han causado también una indudable conmoción en la comunidad de investigadores del sida.

Desde hace tiempo la ciencia se viene preguntando por qué algunos sujetos se escapan de la acción del VIH, pese a pertenecer a grupos de alto riesgo, y por qué en otros infectados el sida avanza a un paso lentísimo. Entre 1978 y 1984, antes de que fuera obligatorio el análisis rutinario de la sangre procedente de donaciones, se infectaron casi 12.000 hemofílicos que recibieron transfusión sanguínea; sin embargo, entre el 10 y el 25 por ciento de esas personas se libraron del virus. Y aproximadamente el 1 por ciento de los portadores del VIH permanecieron



bastante sanos durante períodos de tiempo insólitamente largos, de 15 años o más, sin síntomas apenas y con un sistema inmunitario que funcionaba de forma adecuada.

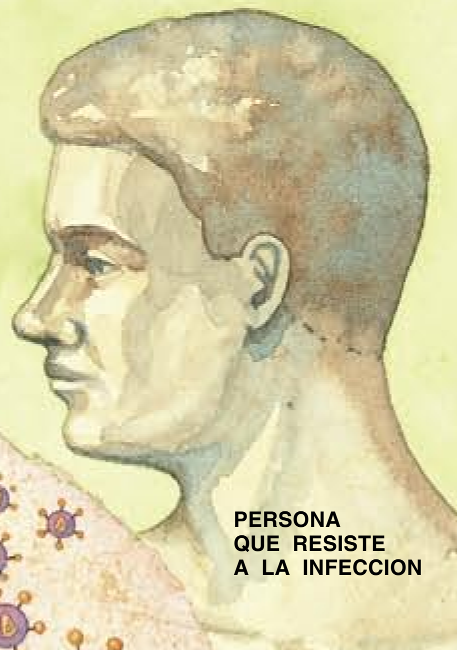
A tenor de ciertos descubrimientos recientes, hay personas que son parcial o totalmente resistentes a las infecciones del VIH gracias a sus genes; para ser más exactos, deben esa buena estrella a cierta variante de un gen implicado en la función inmunitaria, de la que son portadoras. Este hallazgo ha desencadenado un alud de esfuerzos para traducir los nuevos conocimientos genéticos en estrategias innovadoras encaminadas a prevenir y controlar las infecciones del VIH. (Utilizamos el término "VIH" para referirnos al VIH-1, el virus responsable de la mayoría de los casos de sida en todo el mundo. Otra forma del virus, la VIH-2, produce el síndrome con mayor parsimonia y está restringido a determinadas zonas de Africa. No se ha estudiado todavía la resistencia genética al VIH-2.)

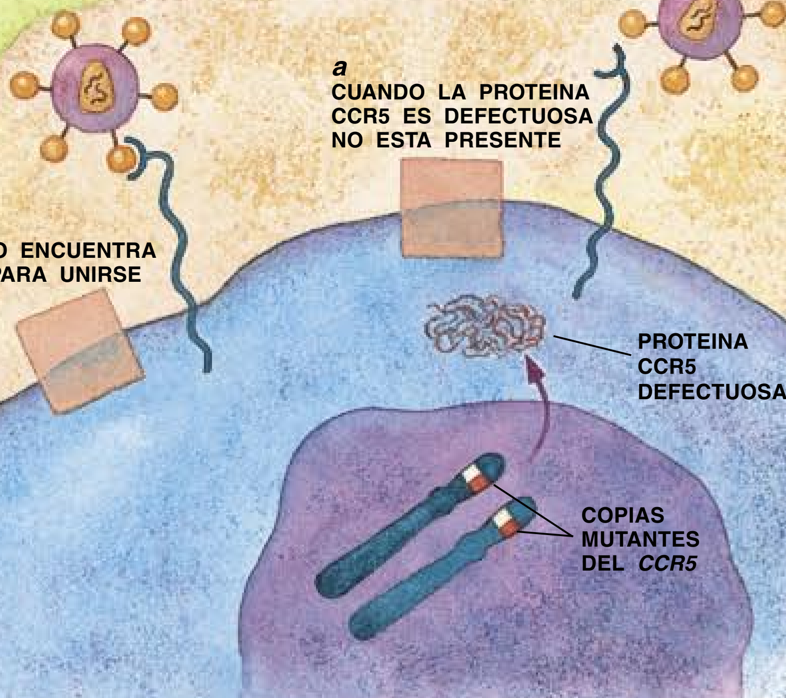
La historia del hallazgo del primer gen de resistencia al VIH es el relato de un período de desesperante lentitud en las investigaciones, en el que de pronto empiezan a producirse descubrimientos extraordinarios. Junto con nuestros colegas del Instituto Nacional del Cáncer (INC), iniciamos la búsqueda de tales genes en 1984, un año después de que se confirmase que el VIH era el agente causal del sida y tres desde que se identificara la enfermedad.

En aquel entonces nuestro proyecto parecía una empresa revolucionaria. En los años ochenta, para explicar el fenómeno de la distinta respuesta al VIH mostrada por los componentes de un mismo grupo, la mayoría de los investigadores aducía razones del tenor siguiente: características genéticas del virus (estirpes diferentes tendrían virulencia distinta) o "cofactores" no genéticos que pudiesen influir en su virulencia (infección concomitante del paciente por otro microorganismo). Carecíamos, además, de pruebas convincentes de la existencia de una protección genética contra el sida en humanos. De hecho, había compañeros nuestros que llegaron a mirar con escepticismo la posibilidad de hallar algo vinculado con causas genéticas, tras invertir tantos recursos y tanto tiempo.

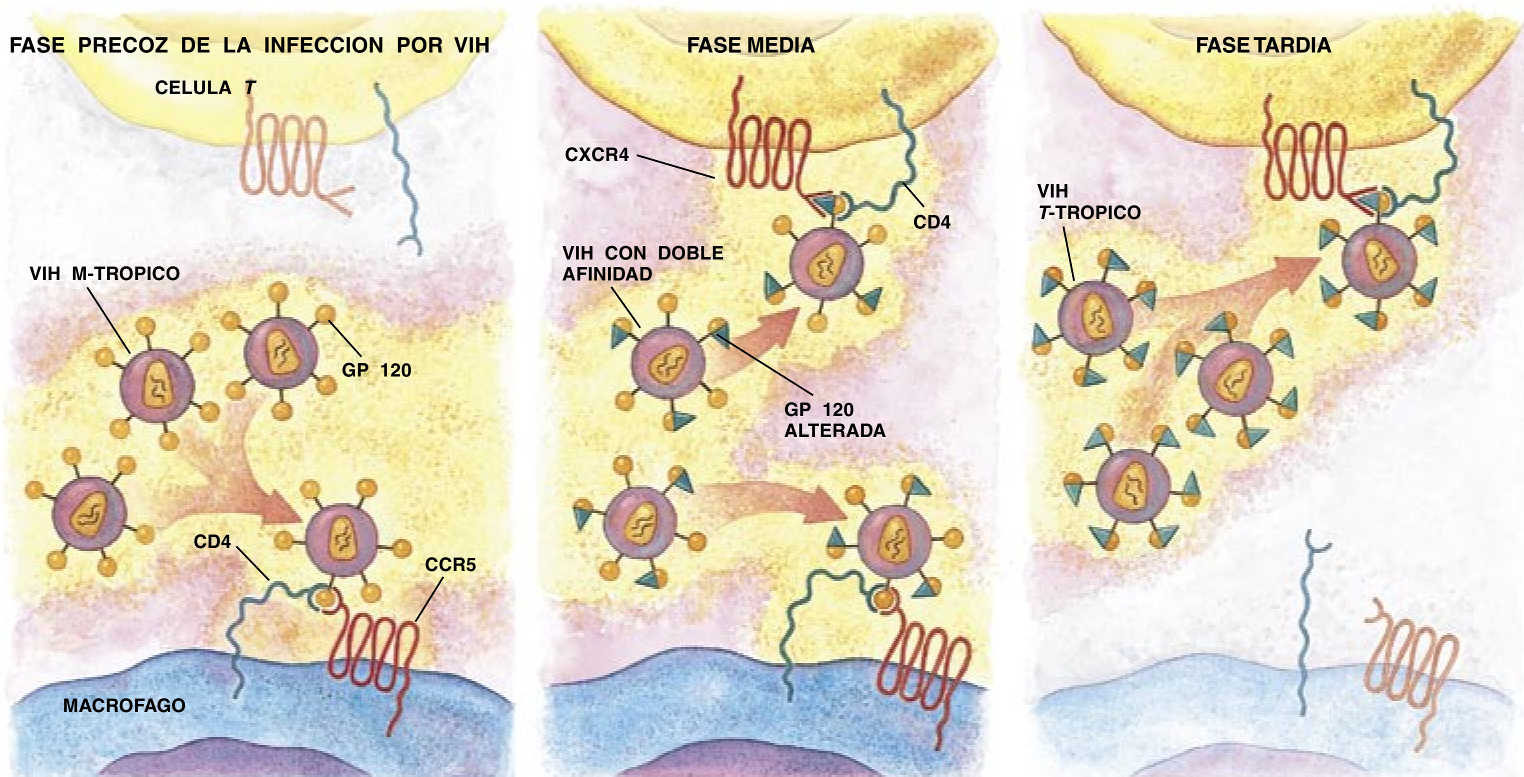
Pese a todo, no nos lanzamos a ciegas en esa aventura. Las investigaciones con animales habían establecido sin ambages que, a menudo, los genes influyen en la producción y desarrollo de infecciones, sobre todo en las causadas por retrovirus, familia a la que pertenece el VIH. La mayoría de los genes cifran información para sintetizar proteínas, que son las moléculas que acometen la mayoría de las funciones celulares. Cuando se activa un gen de una proteína, su secuencia de nucleótidos de ADN sirve de guía para ensamblar la secuencia de aminoácidos que define dicha proteína. Si el gen es polimórfico —es decir, si está presente en más de una forma en la población— sus variantes, o alelos, pueden determinar proteínas que operen de manera distinta. En ratones, se conocen alelos específicos de más de 30 genes que confieren resistencia a retrovirus.

Otras investigaciones con animales habían demostrado también la presencia de un componente genético en las enfermedades infecciosas. Los ratones, ratas y ganado con alto grado de consanguinidad (endogamia) se muestran especialmente proclives a las enfermedades contagiosas. El motivo principal reside en la consanguinidad, que limita bastante el repertorio de alelos de resistencia a





1. EL GEN DE LA PROTEINA CCR5 está relacionado con la resistencia frente al VIH, el virus que produce el sida. Las personas que portan versiones (alelos) normales del gen (*página anterior*) presentan la proteína CCR5 en células denominadas macrófagos (*a*). Junto con la proteína CD4, la CCR5 puede enlazarse con el VIH (*b*) y permitir que éste infecte a los macrófagos (*c*). Por el contrario, las personas que poseen sólo versiones delecionadas del gen *CCR5* (*esta página*) resisten a la infección, debido a la ausencia de la proteína producida por el gen mutante (*a*). En ausencia de la proteína CCR5 (*b*), el VIH no puede invadir los macrófagos (*c*).



2. LA AFINIDAD DEL VIH por las células inmunitarias cambia con el tiempo dentro de los pacientes infectados. De entrada, el virus es M-trópico (*izquierda*) y tiene afinidad por los macrófagos, a los que invade tras unirse (mediante su proteína gp120) a las moléculas de CD4 y CCR5 presentes en la superficie de dichas células. Puede acontecer, sin embargo, que el VIH goce de una doble afinidad (*centro*). Esas estirpes producen moléculas gp120 capaces de reconocer a la proteína CXCR4 presente en la células *T* que contienen CD4; así, pueden infectar tanto a los macrófagos como a las células *T*. Más tarde, el grueso de la población vírica puede cambiar sus preferencias hacia los receptores CXCR4 y convertirse en "*T*-trópicos" (*derecha*). Los virus *T*-trópicos, al destruir las células *T* infectadas, contribuyen a arruinar el sistema inmunitario, posibilitando el desarrollo del sida.

enfermedades. En los grupos donde no se da consanguinidad (exogamia) una parte de la población podría portar algún alelo que protegiera contra un determinado patógeno. Ese alelo permitiría a sus portadores sobrevivir ante una eventual epidemia y aseguraría la pervivencia del grupo. Considerada la diversidad genética de las poblaciones humanas, sospechábamos que, lo mismo que ocurre con otras especies exógamas, tendrían alelos capaces de conferir resistencia a enfermedades y, quizás, al virus VIH. Simplemente, había que descubrirlos.

Además, aunque en humanos habían aparecido muy pocos alelos de resistencia ante agentes patógenos, no faltaban estudios epidemiológicos que abogaban por una enérgica influencia genética en la proclividad a la patología. En ese sentido, uno de los análisis demostraba que, si un progenitor biológico de un individuo adoptado moría de una enfermedad infecciosa antes de cumplir los 50 años, el adoptado tenía un riesgo notablemente alto de morir también de una infección.

Para nuestro infortunio, la ciencia no ofrecía medios sencillos que nos facilitaran la búsqueda de alelos de resistencia al VIH en humanos. Nos vimos, pues, forzados a recurrir a la combinación de conocimientos y técnicas de tres disciplinas dispares: la epidemiología del sida, la genética molecular humana y la genética de poblaciones.

De entrada, necesitábamos un reservorio de genes de las poblaciones que nos interesaban. Habíamos de trabajar con individuos que corriesen un riesgo alto de resultar infectados por VIH y que terminaran o por caer infectados tras quedar expuestos al virus o por librarse. Si los dos grupos diferían genéticamente —esto es, en sus alelos para genes específicos— podíamos sospechar que los genes que presentaban variación influían en la propensión a las infecciones por el VIH.

Para obtener el ADN humano que se necesitaba en nuestra investigación, solicitamos la colaboración de los epidemiólogos que intentaban aclarar el comportamiento de la, por entonces, nueva pandemia. Esos profesionales controlaban grupos de varios cientos de individuos con alto riesgo de ser infectados por el VIH: homosexuales, consumidores de droga por vía intravenosa y hemofílicos que habían recibido sangre contaminada. Esos grupos debían ser sometidos a un seguimiento durante años por

STEPHEN J. O'BRIEN y MICHAEL DEAN han colaborado juntos durante más de un decenio. O'Brien dirige desde 1986 el laboratorio de diversidad genómica del norteamericano Instituto Nacional del Cáncer. Es figura de renombre internacional en el campo de la genética y retrovirología. Dean es jefe de la sección en el mencionado laboratorio del INC, donde aplica nuevas técnicas genéticas al estudio de enfermedades humanas. Los autores dedican este artículo a la memoria de Daniel O'Brien, hermano de Stephen, que murió de sida en 1994.

médicos que (con el permiso de los pacientes) suministrarían muestras de sangre y tejidos y nuevos casos a los investigadores. Conforme se iban recogiendo las muestras de sangre, nuestro equipo de biología celular, dirigido por Cheryl Winkler, se encargaba de producir líneas inmortales de células cultivadas, que serían una fuente ilimitada de ADN para los ensayos genéticos.

Para determinar qué genes debíamos comparar, apelamos a los métodos que en su avance aportaba la cartografía genética, un conjunto de procedimientos que indica la localización de genes en los cromosomas y determina sus secuencias de nucleótidos. Hay ya cartografiados más de 6000 de los aproximadamente 50.000 o 100.000 genes implicados en los cromosomas humanos. Pero en 1984 no llegaban al millar los cartografiados. Pese a ello, hasta el manejo de 1000 genes en nuestros grupos de afectados de sida constituía una tarea imposible.

Limitamos algo la selección. Nos lo permitían los conocimientos ya establecidos sobre el comportamiento de los retrovirus en sus hospedadores. El hospedador es siempre un colaborador de conducta imprevisible ante la infección y la propagación de los patógenos por los tejidos. Para entrar en las células, los virus deben reconocer ciertas proteínas, cifradas por genes del hospedador y desplegadas por la superficie celular. En condiciones normales esas proteínas actúan como receptores de otras moléculas del hospedador, pero los virus pueden servirse de tales receptores para introducirse en las células.

Una vez en el interior celular, los retrovirus insertan sus genes en los cromosomas del hospedador. Se aseguran así que sus genes, y con ellos una fuente ilimitada de partículas víricas, se transmitan a cada nueva generación de células, en cada tanda de replicación de la célula hospedadora. Aquí, de nuevo, los virus requieren la ayuda del hospedador. Deben reclutar enzimas celulares para integrar los genes víricos en los cromosomas, para producir nuevas partículas víricas e incluso para zafarse de las defensas inmunitarias del hospedador.

Conocidos tales presupuestos, decidimos concentrarnos de momento en unos 50 genes cuyas proteínas podían en principio condicionar el ciclo de vida del VIH. Examinamos también 250 segmentos de ADN polimórficos (variables), identificados de antemano en regiones intergénicas. Si los individuos que estudiábamos diferían sistemáticamente en esos segmentos, las discrepancias indicarían, a su vez, la existencia de diferencias en alelos de genes cercanos. Podríamos, entonces, centrarnos en esos genes y tratar de determinar su función en las células y su papel en la infección del VIH.

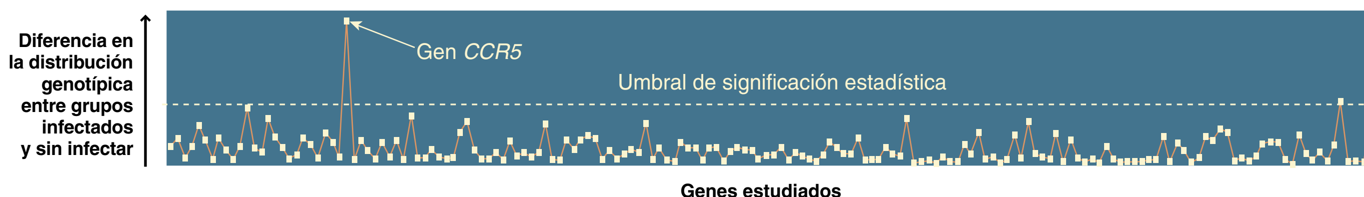
Finalmente, para identificar caracteres genéticos capaces de conferir resistencia al VIH, adoptamos estrategias propias de la genética de poblaciones humanas. Dividimos cada grupo en dos, de acuerdo con aspectos relacionados con su salud —infectados con VIH frente a los que permanecían libres de infección tras una exposición prolongada; pacientes infectados donde progresaba el sida con rapidez frente a los que experimentaban un avance lento del mismo o no lo desarrollaban; pacientes infectados que contraían una enfermedad específica relacionada con el sida (neumonía debida a *Pneumocystis carinii* o sarcoma de Kaposi) frente a los que no la sufrían.

Una vez realizadas estas particiones, comparamos la frecuencia con que cada alelo o segmento polimórfico conocidos aparecían en cada grupo. También comparamos los genotipos. Por herencia recibimos dos copias de todos los genes (una copia de la madre y otra del padre), excepto de los que están en los cromosomas sexuales; el par de alelos de un locus cromosómico particular, o localización génica, constituye el genotipo. Quienes heredan dos alelos idénticos de un determinado gen se dice que son homocigóticos, y los que heredan dos alelos distintos, heterocigóticos.

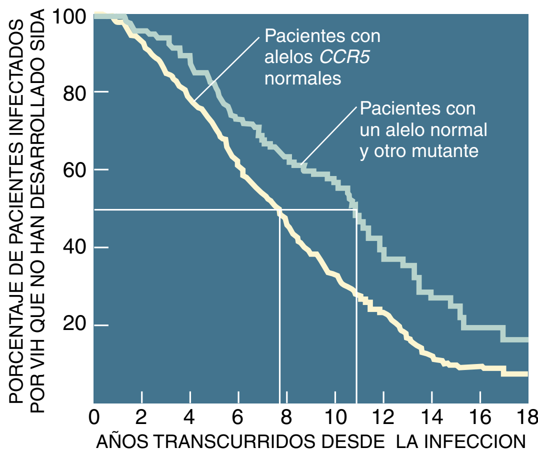
En nuestros análisis anotábamos los porcentajes de pacientes de cada grupo que eran homocigóticos para un alelo y el porcentaje que era heterocigótico. La existencia de diferencias significativas en frecuencias alélicas, genotípicas o ambas, entre dos grupos de sujetos, denunciaría que el gen estudiado tendría quizás alguna relación con los destinos divergentes de los individuos de esos grupos.

Año tras año fue aumentando el número de pacientes, genes, segmentos polimórficos y programas informáticos que utilizábamos para el análisis de los datos. Periódicamente creíamos observar alguna diferencia genética, pero casi siempre resultaba falsa cuando se analizaba con mayor detalle. Mientras tanto, procurábamos estar al día de los avances que se apuntaba la inmu-

	2 copias del alelo *CCR5* normal	2 copias del alelo *CCR5* mutante	1 copia del alelo *CCR5* normal y otra mutante
Individuos infectados por VIH	85 por ciento	0 por ciento	15 por ciento
Individuos no infectados	83 por ciento	3 por ciento	14 por ciento



3. LAS DIFERENCIAS GENETICAS entre dos poblaciones (*gráfica*) revelan la intervención del gen *CCR5* en la resistencia contra el VIH. Los autores del artículo empezaron por identificar los genotipos, o combinaciones de alelos, para 170 genes en sendos grupos de individuos: uno, formado por pacientes infectados con el VIH, y otro, por individuos sin infectar. Así, por ejemplo, midieron el porcentaje de personas que presentaban dos copias del alelo *CCR5* normal, dos copias del alelo mutante delecionado o una copia de cada uno (*tabla*). Para cada gen representaron las diferencias estadísticas (*puntos*) de distribución genotípica entre las dos poblaciones estudiadas. De todos los genes examinados, sólo las diferencias para el gen *CCR5* resultaron significativas.



4. COMPARACION de la evolución de la infección en individuos infectados por el VIH. Este tipo de estudios reveló que los pacientes que tenían una copia del gen *CCR5* mutante (*línea verde*) tardaban más tiempo en desarrollar el sida que los que portaban sólo alelos normales de dicho gen (*línea amarilla*). Por ejemplo, en el primer grupo, el 50 por ciento de los individuos empezó a desarrollar el sida a los 11 años de la infección, mientras que en el segundo grupo ese punto se alcanzó antes, casi a los 8 años de la infección.

nología humana y conocer cuánto se adelantaba en el comportamiento del VIH en el cuerpo. Procurábamos estar alerta ante posibles pistas que nos indicasen cómo identificar otros posibles genes candidatos. A finales de 1995 y principios de 1996, tras un decenio largo de trabajo tedioso y absorbente, el panorama empezó a cambiar.

El nuevo cuadro lo pergeñaron otros equipos investigadores, que resolvieron dos viejos misterios relacionados con la interacción molecular entre el VIH y las células hospedadoras. Su esclarecimiento despejó el camino hacia los genes implicados en la resistencia al VIH.

A mediados de los años noventa era ya obvio que la deficiencia inmunitaria se debía al VIH, que mermaba la población de linfocitos *T*. Estos leucocitos presentan una proteína denominada CD4 en su superficie. Las células *T* suelen dirigir muchos aspectos de la respuesta inmunitaria ante la agresión vírica. También se sabía que el VIH infectaba y permanecía durante años en otra clase de células inmunitarias portadoras de moléculas CD4, los macrófagos. El VIH no destruye a los macrófagos; se encuentra a salvo en su interior.

En condiciones normales, las moléculas CD4 de los linfocitos *T* y de los macrófagos participan en los sistemas de señalización entre células inmunitarias. Pero cuando el VIH entra en acción, las moléculas CD4 se unen a una proteína azucarada (gp120) que sobresale de la cubierta exterior del VIH; esa trabazón facilita la entrada del virus en la célula. Algunos experimentos habían demostrado que CD4, aunque necesaria para la entrada del VIH en las células, no era suficiente. Las células debían presentar al menos otra proteína a la que se agarrara el virus. Diez años después del descubrimiento del VIH, sin embargo, seguía ignorándose la naturaleza exacta de ese segundo receptor.

El otro misterio tenía que ver con un descubrimiento del que había informado, en 1986, Jay A. Levy, de la Universidad de California en San Francisco. Observó que un tipo de linfocito *T* que portaba una proteína diferente, CD8, secretaba factores supresores; estas moléculas impedían que el VIH, en cultivo, invadiese células que, de suyo, eran proclives a ello. Este tipo de factores supresores que limitaban la infección vírica habían aparecido también en monos africanos portadores del VIS (la forma simia del VIH), que no desarrollaban sida, así como en personas que sobrevivían a la infección del VIH durante períodos de longitud inusitada. Pero se desconocían los factores supresores en cuestión.

En diciembre de 1995, un grupo de investigadores del norteamericano Instituto Nacional del Cáncer, entre los que se hallaba Robert Gallo, anunciaron que habían identificado tres factores supresores emparentados; bloqueban, decían, la infección de las variantes del VIH que mostraban preferencia por colonizar los macrófagos (las estirpes M-trópicas). Los tres factores resultaron ser quimiocinas conocidas. Estas moléculas constan de cadenas cortas de aminoácidos encargadas de atraer a las células inmunitarias hacia los tejidos dañados o enfermos.

Los comprometidos en la resolución del primer misterio —la búsqueda del segundo receptor del VIH— advirtieron que las quimiocinas actuaban sobre las células defensivas trabándose con proteínas alojadas en la superficie de éstas. No era descabellado pensar, por tanto, que las quimiocinas aisladas por el grupo de Gallo —denominadas RANTES, MIP-1α y MIP-1β— impidiesen la entrada del VIH en las células inmunitarias al unirse y bloquear algunas de las proteínas de la superficie celular que el VIH necesitaba para acceder al interior. En otras palabras, el receptor (o receptores) de superficie celular para las quimiocinas de Gallo podía muy bien llevar una doble vida como segundo receptor para el VIH en macrófagos y quizás en otras células portadoras de CD4.

La idea se resistía a su comprobación inmediata, pues no se habían aislado todavía los receptores celulares para RANTES y sus parientes. Pero ciertos descubrimientos de los que se tuvo noticia a comienzos de 1996 permitieron llevar a cabo tales ensayos y nos proporcionaron nuevos genes para analizar como posibles factores de resistencia.

En efecto, el grupo encabezado por Edward A. Berger, del Instituto Nacional de la Alergia y Enfermedades Infecciosas, aislaron el segundo receptor para las variantes del VIH que mostraban preferencia por la colonización de los linfocitos *T* (estirpe *T*-trópicas). Resultó ser un receptor de quimiocina (denominado CXCR4), si bien la quimiocina que se une a éste difiere de las RANTES, MIP-1α y MIP-1β. Si los descubrimientos de Gallo no convencieron del todo a los investigadores de que los receptores de quimiocinas desempeñaban un papel en la infectividad del VIH, los resultados de Berger despejaron cualquier duda.

Casi simultáneamente, Michael Samson y Marc Parmentier, de la Universidad Libre de Bruselas, aislaron el gen para un receptor reconocido por RANTES, MIP-1α y MIP-1β, y necesario para que estos factores dirijan las células defensivas hacia el tejido dañado. En dos meses, cinco grupos demostraron, por separado, que la proteína cifrada por dicho gen, la actual CCR5, era también el escurridizo segundo receptor para las estirpes M-trópicas del VIH.

Sumados a otros trabajos, estos nuevos descubrimientos sobre los receptores de quimiocinas aclaraban bastante el mecanismo de infección del VIH. El virus inicia la infección estableciendo de entrada su residencia en los macrófagos. Penetra en esas células sirviéndose de su proteína gp120 para unirse a dos receptores de los macrófagos: CD4 y CCR5. Una vez en el interior

Historia natural del alelo de resistencia

El alelo del gen *CCR5* que confiere resistencia frente al VIH es una mutación por deleción. El gen no presenta una distribución geográfica uniforme. Así, no existe prácticamente en las poblaciones africanas, de asiáticos orientales y aborígenes norteamericanos y es raro en los afroamericanos [*véase la segunda columna en la tabla*]. Abunda, por contra, entre los caucasianos (descendientes de los primeros colonizadores del continente americano procedentes de Europa y Asia occidental).

Incluso entre los caucasianos la distribución varía. Una representación de la frecuencia alélica entre caucasianos de Eurasia [*véase el mapa*] revela un gradiente, o clina, descendente desde el norte hacia el sur, hasta alcanzar niveles imperceptibles en Arabia Saudí. La frecuencia se calcula contando el número de copias mutantes presentes en una población y dividiéndolo por el total de copias de *CCR5*, que es la suma total de alelos normales y mutantes.

Estos patrones dan respuesta a algunas preguntas y plantean otras sobre el origen y mantenimiento del alelo mutante, que cifra una proteína CCR5 defectuosa. La aparente ausencia del alelo en Africa indica que dicho alelo surgió después de que los movimientos migratorios abandonasen Africa, algo que se supone ocurrió hace unos 130.000 a 200.000 años. Pero, ¿qué es lo que hizo que el alelo con la deleción alcanzase una frecuencia tan alta en los caucasianos y cuándo ocurrió tal evento?

La inaudita frecuencia del alelo en ciertas partes de Europa y Asia sugiere que algunos hechos catastróficos desencadenados en esas zonas provocaron que los escasos individuos que portaban el alelo mutante se viesen de pronto favorecidos desde el punto de vista reproductivo. De esa manera, al reproducirse, la fracción de población con alelo mutante aumentó con respecto a la situación anterior. Con el tiempo, la frecuencia de alelos *CCR5* mutantes alcanzó niveles más elevados.

Sospechamos que el episodio catastrófico fue una epidemia importante causada por un agente que, como el VIH, utilizaba la proteína CCR5 normal, pero no la forma defectuosa, para infectar las células. Esta hipótesis tiene sentido ya que, en animales, es frecuente encontrar alelos raros que se vuelven más frecuentes porque confieren resistencia frente a agentes patogénicos nuevos. Cuanto más perdura la epidemia, tanto más aumenta la frecuencia de dichos alelos.

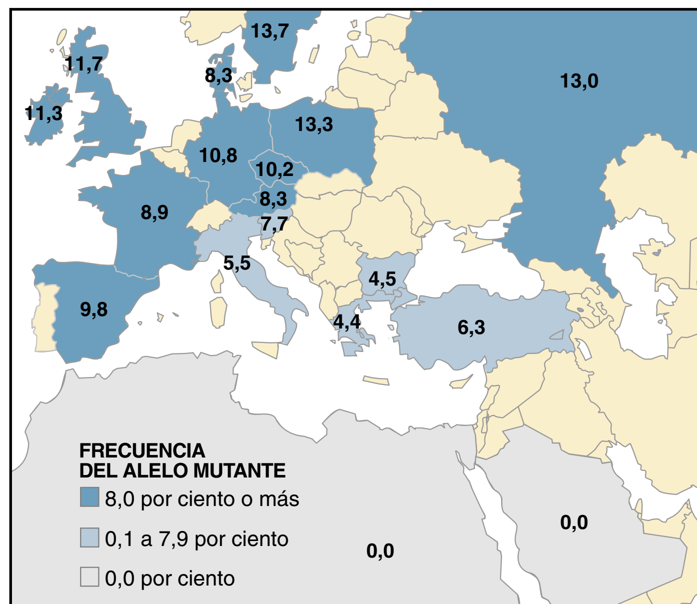
Creemos también que la epidemia eurasiática aconteció hace mucho tiempo. Utilizando métodos genéticos hemos estimado que la catástrofe ocurrió hace unos 4300 años, en cualquier caso no menos de 1200 años. El alelo mutante es menos común en el sur de Eurasia que en el norte, quizá porque el centro de la epidemia se situó en éste.

El origen europeo y asiático occidental de muchos americanos explicaría por qué una fracción relativamente alta de estadounidenses caucasianos es portadora del alelo, ya que sus ancestros lo llevaban en su patrimonio genético. Y algunos afroamericanos poseen el alelo, aunque no así la mayoría de los africanos, debido probablemente a matrimonios mixtos recientes entre africanos y caucasianos en América.

Sobre la identidad del patógeno sólo podemos especular. Un agente como el VIH, que mata a más del 90 por ciento de sus víctimas, pudo haber sido el responsable. El VIH actual no fue el culpable, ya que data de los últimos 20 años, aunque bien pudo haber existido algún antiguo brote, del que no se tiene noticia. No se puede descartar tampoco que fueran los organismos responsables del cólera, tuberculosis o gripe. El que sí se puede descartar es el microorganismo que causó la peste bubónica en el siglo XIV, pues atacó a Europa hace sólo 600 años.

—*S.J.O'B. y M.D.*

Población	Frecuencia del alelo mutante (%)	Frecuencias genotípicas (%)		
	Alelo mutante	2 copias del alelo normal	2 copias del alelo mutante	1 alelo mutante y 1 normal
Caucasianos europeos	10,0	81,0	1,0	18,0
Caucasianos americanos	11,1	79,0	1,2	19,7
Afroamericanos	1,7	96,6	0,0	3,3
Nativos americanos; africanos; asiáticos orientales	0,0	100,0	0,0	0,0



de los macrófagos, el VIH sintetiza grandes cantidades de virus y desafía al sistema inmunitario hasta sus límites.

Años después, el virus, que no cesa de mutar, puede alterar el gen de la gp120 de tal forma que haga que la proteína gp120 cambie su fidelidad por el segundo receptor. El cambio genético origina que la región que reconoce a CCR5 se una con mayor eficacia a CXCR4 en los linfocitos *T*. A partir de entonces, en la población de VIH dominan las variantes *T*-trópicas, las que prefieren infectar células *T*.

Este cambio de afinidad resulta mortal, pues los virus *T*-trópicos matan a las células que infectan. No es ninguna sorpresa que a ese cambio le siga una rápida caída global de

la concentración de células *T* CD4 en los pacientes y, simultáneamente, la aparición de las infecciones oportunísticas y cánceres que durante muchos años han definido al sida. En la actualidad, los Centros de Control y Prevención de Enfermedades definen formalmente al sida por la presencia de afecciones propias del síndrome o por una disminución en la concentración de células *T* CD4 hasta menos de 200 células por milímetro cúbico de sangre; los niveles normales se cifran en 1000 por milímetro cúbico.

En cuanto supimos que CCR5 y CXCR4 eran co-receptores del VIH, decidimos comprobar si los genes para esas proteínas afectaban a la resistencia al VIH en nuestros grupos. A ese respecto, debíamos empezar por determinar si los genes *CCR5* y *CXCR4* eran polimórficos. Si todos los individuos tenían versiones idénticas de esos genes, significaría que tales genes no eran los responsables de las diferencias en la susceptibilidad al VIH.

Todas las copias del gen *CXCR4* examinadas se repetían. Pero en julio de 1996, Mary Carrington, de nuestro grupo, descubrió que uno de cada cinco individuos presentaba una variante del gen *CCR5*. La comparación de las secuencias de nucleótidos de los dos alelos *CCR5* reveló que la más infrecuente tenía 32 nucleótidos menos. Debido a las peculiaridades del código genético, sospechamos que dicha merma podría originar la aparición prematura de una señal de "stop" en el gen, provocando que las células fabricasen versiones más cortas y anormales de la proteína CCR5.

Cuando dividimos al doble millar de pacientes de alto riesgo entre infectados y no infectados, y comparamos sus genotipos *CCR5*, encontramos diferencias espectaculares. El 3 por ciento de los no infectados portaba en sus células sólo el alelo mutante delecionado de *CCR5* (eran homocigóticos). Por el contrario, ninguno de los 1343 del grupo de infectados era homocigótico para el mutante de deleción. La diferencia, que indicaba que la homocigosis para la deleción protegía contra el VIH, era muy significativa estadísticamente, no una casualidad.

Además, la aparente protección que proporcionaba el tener sólo alelos *CCR5* mutantes no dependía de la vía de infección, ya que entre los homocigóticos que no resultaban infectados había homosexuales, hemofílicos y drogadictos. Sospechábamos que la homocigosis para la deleción protegía a los pacientes porque determinaba la producción de proteínas CCR5 truncadas, incapaces de alcanzar la superficie celular o tan deformadas, que no reconocían al VIH.

A las pocas semanas de remitir a *Science* un artículo con estos resultados, nos enteramos de que había otros grupos buscando polimorfismos en los receptores para quimiocinas. Nathaniel R. Landau y Richard A. Koup, del neoyorquino Centro Aaron Diamond de Investigaciones sobre el Sida, habían descubierto de forma independiente el mismo alelo con la deleción de 32 bases. Habían estudiado un grupo de homosexuales con un riesgo alto de exposición al VIH y que no habían resultado infectados. El examen de los leucocitos de dos de esos individuos reveló la ausencia de la proteína CCR5 de la superficie celular. Un examen de la secuencia de nucleótidos de los genes *CCR5* puso de manifiesto que los dos individuos eran homocigóticos para la deleción. Además, en otro trabajo, Samson y el equipo de Parmentier habían buscado sin éxito homocigóticos para la deleción en un grupo de 743 infectados con VIH. (Esos dos artículos salieron publicados en agosto de 1996 y el nuestro en septiembre.)

Otros estudios resaltaban la ausencia de homocigóticos entre africanos, asiáticos o afroamericanos. Señalaban que entre el 1 y el 2 por ciento de los caucasianos americanos (descendientes de europeos o de asiáticos occidentales) eran homocigóticos para la mutación. Además, cuando analizábamos los genotipos de personas sin infectar que habían corrido un riesgo extremado de infección vírica (por reiterada actividad sexual sin protección o por haber recibido dosis elevadas de factores de coagulación contaminados con VIH durante el tratamiento de hemofilia), observamos que hasta el 20 por ciento de esos individuos eran homocigóticos para la deleción. La causa de la resistencia a la infección en el 80 por ciento restante debía tener algún origen genético distinto o era de origen no genético.

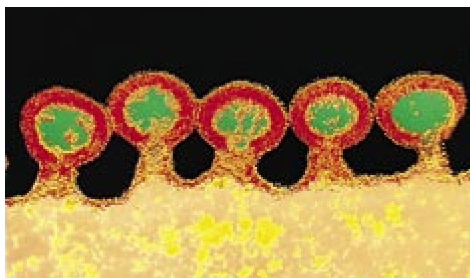
Otros factores que influyen en el avance del VIH

Los genes desempeñan un papel importante en la infección del VIH y en el desarrollo del sida. Pero hay otros factores, entre ellos las propias características del hospedador y del virus, que intervienen también.

Algunas personas responden con un ataque inmunitario contundente nada más sufrir la infección vírica, quizá porque antes han estado expuestas a otro virus con características estructurales parecidas al VIH. Una respuesta temprana enérgica que limite los niveles del VIH puede llegar a eliminar al virus en algunos casos. La contundencia de la respuesta inmunitaria condiciona también el propio desarrollo del sida de los individuos infectados.

El hecho de que una persona esté en lucha con otros virus puede influir en la susceptibilidad al VIH y en el tiempo que tarda en aparecer el sida. La presencia de otras infecciones en el cuerpo provoca la producción de citoquinas, algunas de las cuales se cree que facilitan la entrada del VIH en las células y su replicación.

Finalmente, la propia estirpe vírica puede originar grandes diferencias en el ritmo de progresión del virus. Las estirpes que son muy selectivas en el tipo celular a infectar, que se replican y mutan con parsimonia y que no matan las células hospedadoras no son tan agresivas contra el sistema inmunitario, al menos al principio. No obstante, incluso las estirpes más leves pueden más tarde mutar a formas más violentas. —*S.J.O'B. y M.D.*



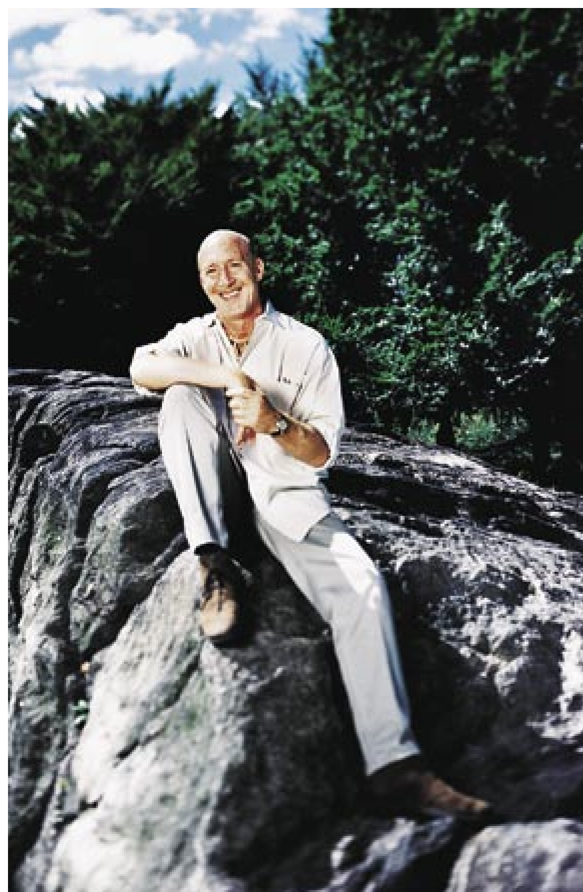
PARTICULAS de VIH saliendo de una célula infectada. Algunas estirpes son más agresivas que otras.

Cabía, pues, pensar que, si dos genes *CCR5* mutantes proporcionaban una protección completa contra el VIH, la presencia de un alelo mutante y otro normal proporcionaría una protección parcial, al reducir a la mitad el número de proteínas CCR5 funcionales sintetizadas por una célula. Cuando analizamos el tiempo transcurrido entre infección y aparición de los síntomas propios del sida, comprobamos que la manifestación de síntomas claros del sida se retrasaba entre dos y tres años en los individuos infectados que portaban un alelo mutante. Este retraso era apreciable tanto en los varones homosexuales como en los hemofílicos. El genotipo heterocigótico (que presentaba el 20 por ciento de los norteamericanos caucasianos, aproximadamente) también retrasaba el momento en el que los niveles de células *T* CD4 bajaban de 200 por milímetro cúbico de sangre.

La emoción era grande. La deleción, cuando se heredaba de ambos progenitores, ofrecía una vigorosa protección genética contra el VIH, incluso después de repetidas exposiciones al virus. Y la herencia de una variedad mutante por deleción podía retrasar el desarrollo del sida en los individuos infectados. Estos resultados venían a decir que un tratamiento capaz de bloquear la interacción del VIH con la proteína CCR5 normal podría proteger a los individuos sanos frente a la infección del VIH, o retrasar el avance del sida en las personas que hubiesen sido ya infectadas con el virus.

Durante años, los laboratorios farmacéuticos habían polarizado sus investigaciones sobre terapias anti-sida en el virus, sin prestar la debida atención a la participación de la maquinaria celular del hospedador en el establecimiento crónico de la enfermedad. Las drogas utilizadas en terapia combinatoria, por ejemplo, salen directamente al paso del desenvolvimiento del propio VIH, impidiendo la operación de algunas de sus enzimas. A tenor de los resultados genéticos, convenía profundizar en la intervención del hospedador en el desarrollo del sida; esos nuevos planteamientos se ordenarían a controlar la replicación del VIH en pacientes infectados o a impedir la propia infección.

Muchos expertos se afanaron en la búsqueda de vías para impedir la interacción entre el VIH y las proteínas CCR5. En teoría, ese tipo de estrategias podría fundarse en la utilización de sustancias capaces de unirse a gp120 y enmascararla. En la práctica, sin embargo, la mayoría de las investigaciones se propuso dar con procesos que taponaran el sitio de CCR5 que reconoce el VIH.



5. STEVE CROHN posee sólo alelos mutantes del gen *CCR5*. Igual que muchos otros que presentan el mismo perfil genético y han corrido un gran riesgo de ser infectados por el VIH, él sigue libre de virus. Los investigadores tratan de encontrar tratamientos que confieran una protección similar a los que portan copias normales del gen *CCR5*.

Un primer asunto a tener en cuenta era que el bloqueo de CCR5 podría resultar arriesgado, ya que si los macrófagos se vuelven sordos a las llamadas de RANTES y otras quimiocinas relacionadas podría resentirse la inmunidad. Pero este temor se disipó en seguida. Los individuos que poseen dos alelos mutantes no presentan problemas inmunitarios ni ninguna patología hística; muestran una salud envidiable. Es evidente que otros receptores de quimiocinas son capaces de compensar la falta de CCR5. Dos de ellos (CCR2B y CCR3) pueden también servir de co-receptores del VIH, aunque en condiciones normales no desempeñan ese trabajo con la eficacia que caracteriza a CCR5.

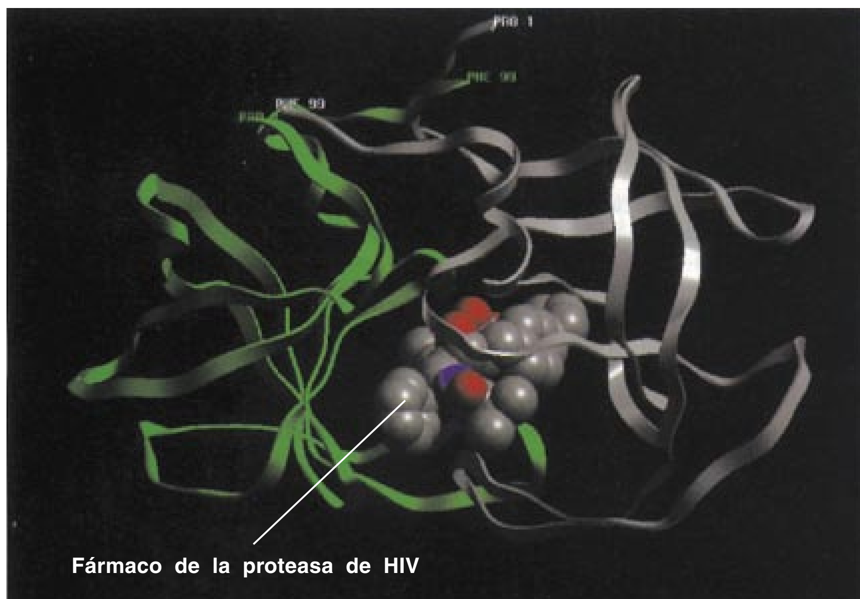
Entre las estrategias terapéuticas sometidas a consideración se baraja la introducción directa en el organismo de moléculas capaces de hacer inaccesible al VIH el sitio por el que se une a CCR5. Se citan, entre esas moléculas, las quimiocinas o sus derivados sintéticos. En ese orden, un equipo internacional ha desarrollado un derivado químicamente modificado de RANTES, muy prometedor en el tubo de ensayo. Revisten parejo interés los antibióticos sintéticos, moléculas inmunitarias de mayor tamaño que podrían dirigirse específicamente al CCR5 para impedir la unión del VIH.

Se habla, asimismo, de la vacunación con fragmentos de CCR5. Con esa práctica, el sistema inmunitario del receptor se vería inducido a fabricar sus propios anticuerpos contra CCR5. Y se ensaya con el recurso a la ingeniería genética para producir macrófagos con nuevos genes cuyos productos impidan la síntesis de CCR5 o que lo inutilicen como sitio de unión para el VIH.

Para quienes se enfrentan a una muerte inminente —con sida terminal y linfomas—, nuestro grupo está considerando modificar un tratamiento radical, cada vez más utilizado en el tratamiento de casos avanzados de leucemias o cánceres de mama. Cuando se trata de abordar esos cánceres, los pacientes se someten a dosis altas de quimioterapia o radioterapia para las células tumorales. Puesto que la terapia destruye las células hematopoyéticas de la médula ósea (entre ellas, las que originan el sistema inmunitario), los médicos vuelven a reconstituir el sistema inmunitario del paciente introduciéndoles médula sana compatible.

¿Y en el caso del sida? Nosotros nos proponemos destruir todas las células sanguíneas infectadas por el virus y reintroducirle al paciente médula ósea de donantes homocigóticos para la deleción del gen *CCR5*. Este último paso coadyuvaría a proteger al paciente contra nuevas infecciones del VIH y a impedir también la propagación célula-célula de cualquier partícula de VIH que hubiese sobrevivido al tratamiento antivirus. Eso pensamos.

Aunque la idea de simultanear curación y protección contra VIH



6. MEDICAMENTOS INHIBIDORES DE PROTEASA que frenan la reproducción del virus de la inmunodeficiencia adquirida. En los últimos años, se han desarrollado fármacos que ayudan a sobrevivir a muchos pacientes.

residuales o secuestrados resulta muy atractiva, hay que andar con tiento antes de emprender una terapia de médula ósea. Por varias razones importantes. En primer lugar, los transplantes de médula ósea encierran en sí mismos un riesgo: las diferencias inmunitarias entre donante y receptor pueden originar un rechazo del transplante o, lo que es peor, pueden hacer que las células inmunitarias de la médula donante ataquen a los tejidos del receptor y maten al paciente.

Además, en los últimos meses, se han descubierto individuos que son homocigóticos para la deleción y, pese a ello, se han infectado con el VIH. Ignoramos el motivo y el mecanismo de ello, si bien ciertos indicios inducen a sospechar que el agente era una estirpe *T*-trópica insólita, poderosamente virulenta, que suele aparecer sólo en los últimos estadios de la infección del VIH.

Creíase hasta ahora que los virus *T*-trópicos no se propagaban de una persona a otra, porque el sistema inmunitario sano de los individuos que se exponían al virus era capaz de reconocerlos y destruirlos. Sólo los virus M-trópicos serían capaces de reinfectar con éxito, al multiplicarse en los macrófagos sin que su presencia provoque la destrucción de esas células. Algunos indicios sugieren que los pacientes que han resultado infectados, a pesar de ser homocigóticos para la deleción, lo deben simplemente a la mala fortuna de encontrar una estirpe *T*-trópica rara, capaz de sortear las defensas inmunitarias y provocar la infección, sin necesidad de contar con las estirpes M-trópicas para hacer el trabajo preliminar. Cabe, además, la posibilidad de que la resistencia innata de los pacientes a las estirpes M-trópicas haya acelerado la transición de las estirpe M-trópicas a tipos *T*-trópicos capaces de establecer la infección ellos mismos.

Si la resistencia a las estirpes M-trópicas mediada por CCR5 favorece ese cambio de las estirpes VIH, ello significa que los transplantes de médula ósea, y de hecho cualquier tratamiento preventivo o terapéutico pensado para bloquear el acceso del VIH a CCR5, podría resultar perjudicial al estimular, en vez de impedir, la infección y el desarrollo del sida. Pero no deja de ser tranquilizador el que la mayoría de la gente que es homocigótica para la deleción se libre de la infección, en vez de sucumbir ante los virus *T*-trópicos. No obstante, antes de que los médicos puedan recetar, de forma rutinaria, antagonistas de CCR5, los investigadores deben demostrar que tales fármacos mejoran, y no disminuyen, las probabilidades de supervivencia.

Además de investigar formas eficaces y seguras de sacar provecho de los logros de la genética, los expertos siguen buscando en el genoma otros factores que sugieran nuevas estrategias para proteger al hombre contra la agresión del sida. Es el caso, por ejemplo, de nuestro propio grupo. Hemos identificado una variante del gen *CCR2B*, que, incluso cuando se presenta en una sola copia, retrasa la aparición del sida dos o tres años, igual que ocurre en los heterocigotos para *CCR5*. A principios del año en curso, Jianglin He, del Instituto Dana-Faber de Investigaciones Oncológicas, ha dado a conocer que la proteína CCR3 facilita la entrada del VIH en la microglía (células inmunitarias del cerebro) y que el bloqueo de los receptores impide, en el laboratorio, la infección de dichas células por el VIH.

Tras más de una década de búsqueda de rasgos genéticos implicados en la resistencia al sida, nos sentimos satisfechos de la marcha de la investigación. No olvidamos, sin embargo, que el objetivo final es la transformación de los avances genéticos en nuevos procedimientos que permitan evitar o luchar contra el VIH, un virus suficientemente listo como para acabar con todas las células destinadas a eliminarlo. Aunque las aplicaciones terapéuticas se mueven todavía en el reino de la especulación, confiamos en que el concurso de investigadores capaces procedentes de campos muy dispares terminará por encontrar una receta que invierta el avance implacable de la epidemia de sida.

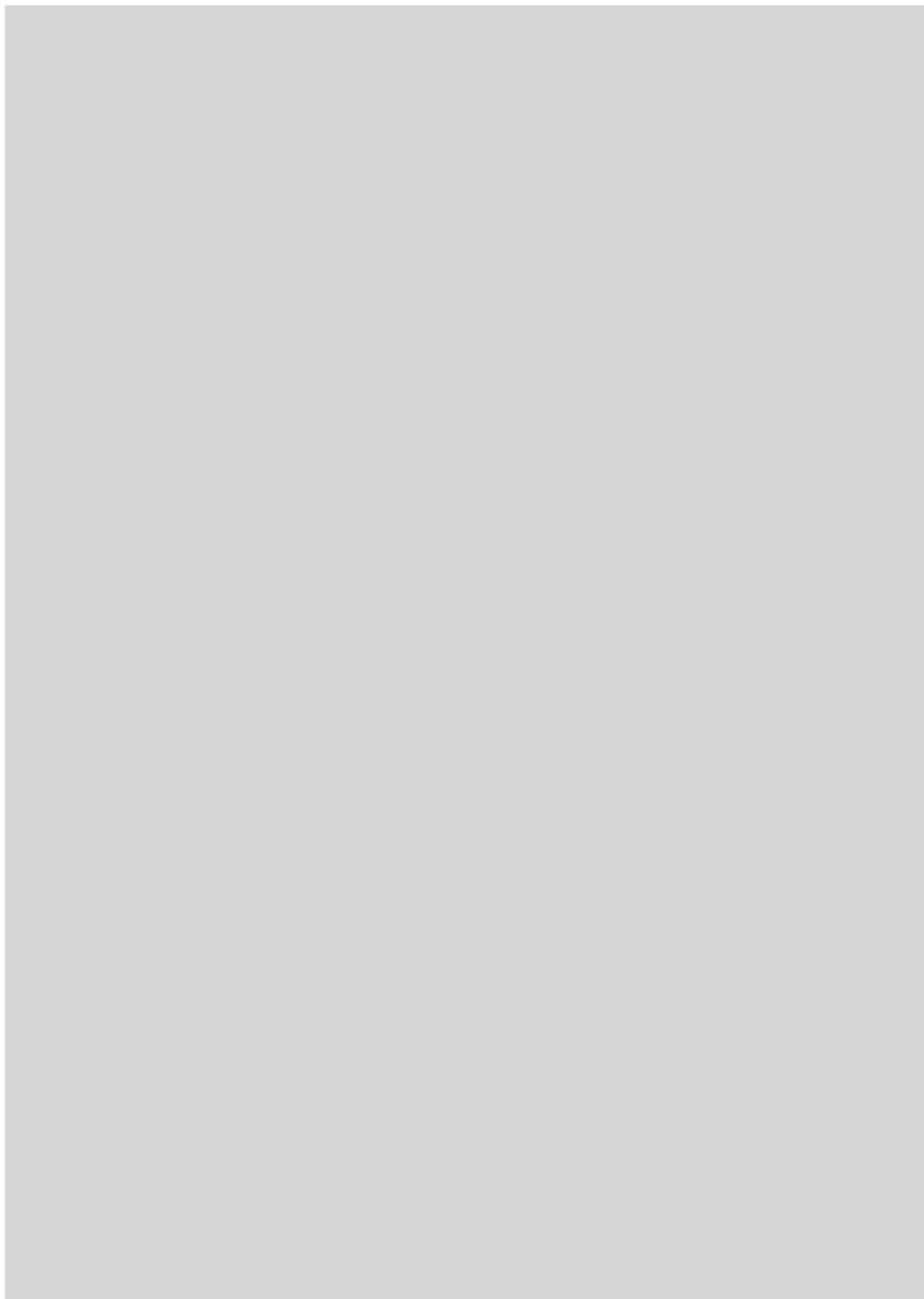
BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

HIV-1 ENTRY COFACTOR: FUNCTIONAL cDNA CLONING OF SEVEN-TRANSMEMBRANE, G PROTEIN-COUPLED RECEPTOR. Y. Feng, C. C. Broder, P. E. Kennedy y E. A. Berger en *Science*, vol. 272, págs. 872-877; 10 de mayo de 1996.

HOMOZYGOUS DEFECT IN HIV-1 CORECEPTOR ACCOUNTS FOR RESISTANCE OF SOME MULTIPLY-EXPOSED INDIVIDUALS TO HIV-1 INFECTION. Rong Liu *et al.* en *Cell*, vol. 86, n.º 3, págs. 367-377; 9 de agosto de 1996.

GENETIC RESTRICTION OF HIV-1 INFECTION AND PROGRESSION TO AIDS BY A DELETION ALLELE OF THE CKR5 STRUCTURAL GENE. Michael Dean *et al.* en *Science*, vol. 273, págs. 1856-1862; 27 de septiembre de 1996

CONTRASTING GENETIC INFLUENCE OF CCR2 AND CCR5 VARIANTS ON HIV-1 INFECTION AND DISEASE PROGRESSION. Michael W. Smith *et al.* en *Science* (en prensa).



El descubrimiento del quark cima

Para hallar el sexto quark hubo que provocar las colisiones de mayor energía y con más partículas que jamás se habían producido

Tony M. Liss y Paul L. Tipton

1. DE LA COLISION VIOLENTA entre un protón y un antiprotón (*en el centro*) emerge un quark cima, o "top" (*en rojo*), y un anticima $\bar{t}$ (*en azul*). Se desintegran en otras partículas produciendo un número característico de chorros y posiblemente un electrón o un positrón.

Se convocaron deprisa y corriendo dos reuniones en el Laboratorio Nacional del Acelerador Fermi, el Fermilab. Se trataba de un acontecimiento histórico; en aulas contiguas, físicos adscritos a dos experimentos distintos, aunque acometidos en ese mismo centro, comunicaban el descubrimiento de una partícula nueva: el quark cima (o quark top). Era marzo de 1995. Habían terminado los casi veinte años de búsqueda de una de las últimas piezas del modelo estándar que faltaba por descubrir.

El quark cima es el sexto quark. Con toda probabilidad, el último también. Junto con los leptones —el electrón y otras partículas afines—, los quarks son el barro del que está hecha la materia. Los más ligeros, los quarks "arriba" y "abajo", forman protones y neutrones. Con los electrones constituyen la tabla periódica entera. Los demás leptones y quarks (el encanto, el extraño, el cima y el fondo) son más pesados; si bien fueron abundantes en los momentos que siguieron a la gran explosión ("big bang"), hoy, por lo común, se producen sólo en los aceleradores. El modelo estándar describe las interacciones entre estos ladrillos. Impone que leptones y quarks se asocien en parejas, en "generaciones".

Los físicos saben que existe el quark cima desde 1977, año en que se descubrió su compañero, el quark fondo. Encontrar el cima fue tarea desesperante. Aunque es una partícula fundamental y carece de estructura discernible, tiene una masa de 175.000 millones de electronvolts (GeV), tanta como un átomo de oro y mucho más que lo previsto por la mayoría de los teóricos. La del protón, que consta de dos quarks arriba y un abajo, es sólo de menos de 1 GeV. (El electronvolt es una unidad de energía, relacionada con la masa por la fórmula $E = mc^2$.)

Para crear un quark cima, pues, hubo que concentrar inmensas cantidades de energía en una región ínfima de espacio. Se consiguió acelerando dos partículas y haciendo que chocaran una contra otra. Se esperaba que entre unos cuantos billones de colisiones al menos un puñado crease un quark cima a partir de la energía del impacto. Pero se desconocía cuánta energía se precisaría. El modelo estándar predecía muchas propiedades del quark cima —la carga, el espín o momento angular intrínseco—, pero no determinaba la masa.

Aunque las partículas se pueden crear a partir de la energía, ciertas características, la carga eléctrica por ejemplo, no: se "conservan". No es

posible que un quark cima nazca solo. La manera más sencilla de engendrar uno consiste en crear a la vez un anticima, que tiene la misma masa y, cambiados, los signos de las demás propiedades; entre los dos se anulan, pues, las magnitudes conservadas.

El colisionador del Fermilab empezó a funcionar en 1985. Para entonces ya hacía ocho años que se perseguía el quark cima. Las primeras tentativas, en el Centro del Acelerador Lineal de Stanford, en Palo Alto, California, y en el DESY de Hamburgo no dieron resultado. Con los años la caza fue pasando de un acelerador a otro conforme se disponía de haces de partículas de mayor energía. A principios de los años ochenta el choque de haces de protones y antiprotones a energías de 315 GeV generó en el CERN, el laboratorio europeo de física de grandes energías, próximo a Ginebra, dos nuevas partículas, el bosón *W* y el *Z*.

Los quarks y los leptones forman la materia; *W* y *Z* transmiten una fuerza, la débil, que causa algunos tipos de desintegración radiactiva. Este descubrimiento fue una nueva confirmación del modelo estándar, que había predicho con exactitud sus masas. Muchos creían que era inminente el descubrimiento del quark cima en el CERN.

Pero no sería fácil. Cuando los protones y los antiprotones chocan entre sí con grandes energías se produce una colisión entre sus quarks y gluones internos. Cada quark o gluon lleva sólo una pequeña fracción de la energía total de su protón o antiprotón, pero el choque ha de tener la suficiente energía para que se generen los quarks cima. Esas colisiones son raras, y cuanto mayor sea la energía que se necesita —es decir, cuanto mayor sea la masa del cima—, más raras serán.

Para 1988 no se había descubierto todavía el quark cima en el CERN; se concluyó que su masa tenía que ser mayor de 41 GeV. Mientras, el colisionador del Fermilab iba dando muestras de hasta dónde podía llegar con nuestro reciente CDF, el Detector de Colisiones del Fermilab. La década terminó con un breve período de competición intensa entre nosotros y el CERN; no apareció el quark cima, pero supimos que su masa no podía ser inferior a 77 GeV.

Por entonces el CERN había tocado techo. Las energías de sus haces son menores, y no era probable que crease quarks cima de más de 77 GeV. En adelante la pugna sería entre el CDF y un nuevo dispositivo experimental instalado al otro lado del anillo de Fermilab, el D0/ (se lee "D cero", y se refiere a su situación en el anillo.)

A principios de los ochenta Leon M. Lederman, director del Fermilab, decidió que debía haber un competidor local del CDF. Así se nos metió el rival en casa. A partir de 1992 el D0/ fue tomando datos. Que dos experimentos complementarios estudiasen los mismos fenómenos físicos no sólo espoleó a unos y a otros, sino que tuvo un efecto beneficioso adicional. Por mucho que los experimentadores se esfuercen,

CONSTITUYENTES DE LA MATERIA

					CARGA
QUARKS		u ARRIBA	c ENCANTO	t ARRIBA	
	MASA (GeV)	0,3	1,5	175	$+2/3$
		d ABAJO	s EXTRAÑO	b ABAJO	
	MASA (GeV)	0,3	0,5	4,5	$-1/3$
LEPTONES		e^- ELECTRON	μ^- MUON	τ^- TAU	
	MASA (GeV)	0,0005	0,106	1,7	–1
		ν_e NEUTRINO DEL ELECTRON	ν_μ NEUTRINO DEL MUON	ν_τ NEUTRINO DEL TAU	
	MASA (GeV)	0?	0?	0?	0

TRANSMISORES DE LA FUERZA

	BOSONES VECTORIALES			FOTON	GLUON
	W^+	W^-	Z^0	γ	g
MASA (GeV)	80	80	91	0	0
CARGA	+1	–1	0	0	0
FUERZA	DEBIL	DEBIL	DEBIL	ELECTRO-MAGNETICO	FUERTE

Los elementos del modelo estándar

La materia consta de dos tipos de partículas: quarks y leptones. Se asocian por grupos o generaciones. Los quarks arriba y abajo, por ejemplo, construyen, con los electrones, los átomos; son los miembros de la primera generación. Los quarks más pesados se crean sólo en los aceleradores; así pasa con el cima y el fondo. Por cada quark o leptón hay un antiquark o antileptón de carga opuesta (*no se muestran aquí*).

Un conjunto diferente de partículas transmite las fuerzas: los "bosones" *W* y *Z*, el fotón y los gluones. Los *W* y *Z* transmiten la fuerza nuclear débil, que actúa en desintegraciones radiactivas. Por ejemplo, un quark arriba puede convertirse en uno abajo emitiendo una partícula *W*, que a su vez se desintegra en un par de quarks o de leptones. El fotón transmite la fuerza electromagnética, que a grandes energías se unifica con la fuerza débil. Los gluones transmiten la fuerza fuerte que enlaza los quarks arriba y abajo y así se forman los protones y los neutrones. Se cree que existe una partícula más, la de Higgs, que aún no se ha encontrado.

—T.M.L. y P.L.T.

siempre caben resultados espurios. Un segundo experimento sirve de refrendo.

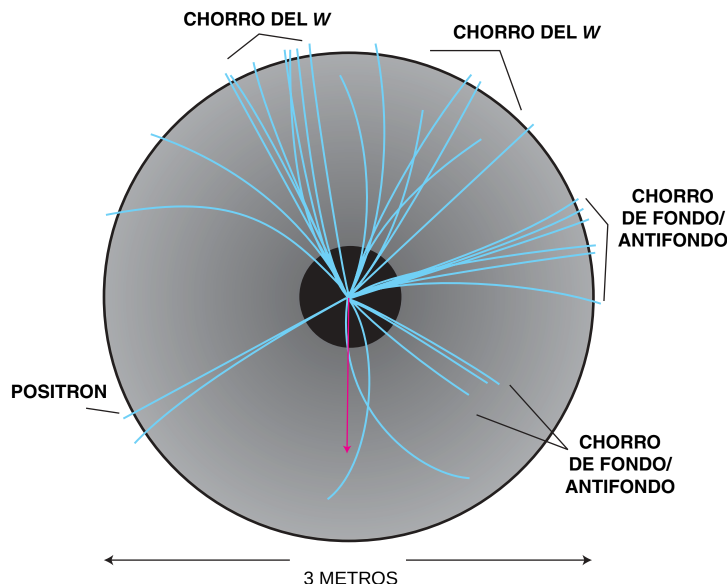
Tanto en el equipo del CDF como en el del D0/ trabajan más de 400 físicos de distintos países. A ellos hay que añadir un sinnúmero de ingenieros, técnicos y personal auxiliar. Los dos equipos rivales son autónomos en sus decisiones y análisis. Cada uno intenta adelantarse al otro en los descubrimientos. Pero es una competición amistosa y solemos compartir mesa en la cafetería.

En el código no escrito de los dos experimentos está el que no se comenten fuera del propio equipo los resultados de los análisis físicos hasta que no se hayan cerrado. Sin embargo, a la vista estaba la imposibilidad de guardar los secretos de la búsqueda del cima. Por citar un dato: hay al menos tres científicos cuyo cónyuge pertenece al equipo antagonista. Para atajar rumores infundados, llegamos con los del D0/ al acuerdo de que, si uno de los grupos experimentales estaba a punto de obtener un descubrimiento sensacional, avisara al otro con una semana de antelación.

El dispositivo fundamental en todo experimento de grandes energías es el detector, que registra los residuos de las colisiones. Basándonos en los mejores cálculos teóricos esperábamos que alrededor de una de cada 10.000 millones de colisiones produjese un quark top. Las demás, aunque interesantes en otros proyectos, constituían sólo el trasfondo complejo del que habría que extraer el quark cima.

Diez años dedicaron el equipo del CDF y el del D0/ a la preparación de enormes y refinados instrumentos, con cientos de miles de canales electrónicos, que pudiesen reconocer la "firma" del quark cima, la traza que dejaría en los detectores. El punto fuerte del sistema de detección del CDF estriba en su capacidad de seguir con precisión las trayectorias de las partículas elementales en un campo magnético (para medir sus momentos); el del D0/ es un calorímetro segmentado, sumamente preciso, que mide la energía de cada colisión.

TONY M. LISS y PAUL L. TIPTON, que han contribuido a la construcción de componentes fundamentales del Detector del Colisionador del Fermilab (CDF), han coordinado también el grupo de búsqueda del quark cima.



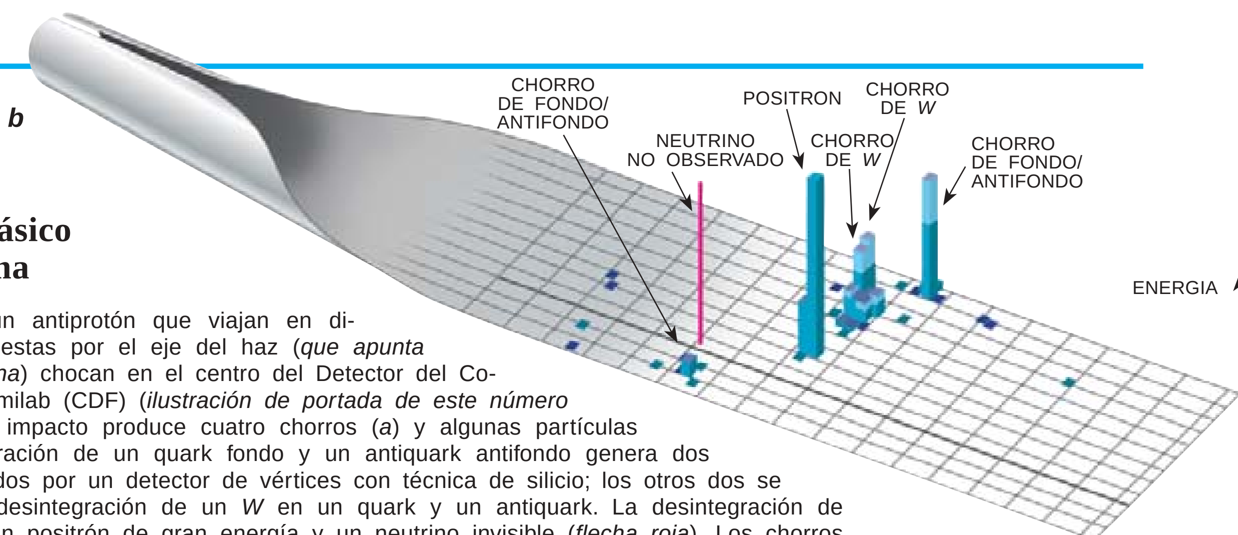
El quark cima y el antiquark anticima, una vez producidos, se desintegran casi de inmediato. A diferencia de los quarks arriba y abajo, que son estables, el cima tiene una vida media de sólo 10^{-24} segundos. El modelo estándar predice que, si posee masa suficiente, el quark cima se desintegrará casi siempre en un *W* y un quark fondo. Así que, si se creaban, el cima y el anticima iban a generar dos *W*, un quark fondo y un antifondo.

Por desgracia, ni el *W* ni el fondo pueden observarse de forma directa. La vida media del *W* es aproximadamente la misma que la del quark cima. El quark fondo también es inestable, pero vive mucho más que el cima. Además, no pueden verse nunca quarks sueltos, o "desnudos". La interacción fuerte, que los une, hace que aparezcan siempre ligados a otros quarks y antiquarks, bien en pares, es decir, en mesones, o en tripletes, es decir, en bariones. (Los protones y neutrones son bariones.) Cuando de una colisión sale un quark, le "viste" una nube de otros quarks y antiquarks. Se observa un chorro, un haz de partículas orientado en una dirección determinada, más o menos la que tenía el movimiento del quark original.

La partícula *W* puede desintegrarse en un quark y un antiquark de la misma generación, un arriba y un antiabajo, por ejemplo. En tal caso, quark y antiquark aparecen en el detector de partículas en forma de dos chorros. Pero *W* puede desintegrarse también "leptónicamente", es decir, en un leptón cargado y otro neutro de la misma generación, un electrón y un neutrino, por ejemplo.

Si el leptón cargado es un electrón o un muon (una copia más pesada del electrón), el detector lo observará directamente. Pero si es un tau (una copia aún más pesada del electrón), se desintegrará en seguida y costará identificarlo. El neutrino (que carece de masa o la tiene muy pequeña) atraviesa los detectores inadvertido. No obstante, podemos inferir su presencia porque se lleva consigo momento. Si se suman los momentos de todas las partículas vistas en el detector y falta una cantidad apreciable, se presupone que un neutrino se la ha llevado.

Cuando empezamos en agosto de 1992 a tomar datos, subimos el límite inferior de la masa del quark cima a 91 GeV. Fue un hito. El *W* es el vehículo de la interacción entre los quarks de la misma generación y, por tanto, entre cima y fondo. Si el quark cima hubiera sido lo bastante ligero —menos de unos 75 GeV—, un *W* podría haber producido un cima desintegrándose en él y un antifondo. Ahora sabíamos que la única forma



Un suceso clásico de quark cima

Un protón y un antiprotón que viajan en direcciones opuestas por el eje del haz (*que apunta afuera de la página*) chocan en el centro del Detector del Colisionador del Fermilab (CDF) (*ilustración de portada de este número de la revista*). El impacto produce cuatro chorros (*a*) y algunas partículas más. La desintegración de un quark fondo y un antiquark antifondo genera dos chorros, identificados por un detector de vértices con técnica de silicio; los otros dos se producen por la desintegración de un *W* en un quark y un antiquark. La desintegración de otro *W* produce un positrón de gran energía y un neutrino invisible (*flecha roja*). Los chorros múltiples acompañados por un positrón alertan a los experimentadores de la posible creación de un quark cima.

Un campo magnético dirigido a lo largo del haz curva las trayectorias de las partículas cargadas. La dirección de la curvatura dice el signo de la carga; su magnitud, el momento. Además, un calorímetro circunda el haz; mide la energía de las partículas producidas por la colisión. En el dibujo está desenrollado (*b*). La altura de las barras indica la energía liberada por las partículas en el segmento correspondiente. Gracias a la combinación de aparatos es posible reconstruir el suceso original (*representado en la figura 1*) con un elevado grado de fiabilidad.

—T.M.L. y P.L.T

de encontrar un cima sería creando un par cima-anticima.

Una de las características más llamativas de la creación de un "suceso" de quark cima son los chorros producidos por los quarks fondo. El quark fondo viaja en un chorro como parte de un mesón o de un barión y se desintegra a medio milímetro de donde se generó. En 1992 empezamos a seguir las trayectorias de las partículas de los chorros con fina precisión merced a un instrumento especial instalado sobre la zona misma donde chocaban los haces. Este detector de vértices con técnica de silicio podía localizar la trayectoria de una partícula con una precisión de 15 micrometros. Esperábamos que, hallando la mayoría de las trayectorias del chorro y extrapolándolas hacia atrás, daríamos con el punto (el vértice) donde el quark fondo se había desintegrado, y así podríamos atribuir el chorro a un chorro de quark fondo.

La técnica del silicio era novedosa. Nos preocupaba, en particular, el efecto del paso de billones de partículas. Sabíamos que el detector entero se achicharraría en una fracción de segundo si una pifia del acelerador descargaba sobre él los haces. Preparamos un sistema especial de protección que los desviaría y pondría a salvo el silicio si surgía un problema. Mientras nos familiarizábamos con el detector de vértices, el equipo del D0/ emprendió la construcción de su propio detector para el lado opuesto del anillo del acelerador.

A los tres meses, en octubre de 1992, vislumbramos la primera pista del quark cima: un suceso en que aparecieron un electrón y un muon de gran energía, momento perdido en bastante cuantía y dos chorros. Tras analizar el episodio con el mayor detalle, llegamos a la conclusión de que podría ser lo que buscábamos. D0/ había observado también un suceso parecido, y su interpretación más probable era que había emergido un quark cima. Pero no bastaba con un solo suceso; teníamos que observar dicho quark de varias formas diferentes para estar seguros de que el "trasfondo" de colisiones no nos engañaba, de que no había imitado aleatoriamente la firma del cima. Pusimos más atención en el trabajo, pero no descubrimos nada insólito. No cabía duda de que andábamos muy lejos de alcanzar la meta.

Tres grupos participaron en el análisis de los resultados del CDF. Uno de ellos, que lo buscaba entre los sucesos con dos leptones (de dos desintegraciones de *W*) y al menos dos chorros (presumiblemente de los quarks fondo), halló nuestro candidato a primer quark cima. Los otros dos grupos buscaban en los sucesos con un leptón (de la desintegración de un *W*) y chorros (de la otra desintegración de un *W* y de los quarks fondo). Siguieron estrategias diferentes. Uno identificaba los chorros de quark fondo a partir de las señales del detector de vértices, que funcionaba muy bien. El otro buscaba leptones de poca energía, señal de la desintegración de un quark fondo.

Casi al año el CDF había subido el límite inferior de la masa a los 108 GeV, y después el D0/ lo catapultó a 131 GeV. Y seguíamos buscando. En una reunión plenaria del CDF los tres grupos presentaron el estado de su análisis en julio de 1993. Tomados por separado, los resultados de cada grupo pecaban de ambigüedad, pero juntos amasaban una prueba convincente de la detección de un quark cima. Uno de nosotros (Tipton) había comprometido de antemano su asistencia a un congreso, donde expondría nuestros últimos resultados. Tras la reunión, nos percatamos de que si presentábamos los resultados la gente pensaría que habíamos detectado el quark cima. Las cosas no estaban tan maduras. Se convino, pues, que Tipton se centraría en nuestros métodos y en las dificultades que encontrábamos para hallar el quark cima, pero silenciando los últimos avances. Se dispararon los rumores, algunos muy atinados y otros fuera de lugar. De nada sirvió que suspendiésemos en la primavera de 1994 nuestra ponencia en un congreso importante.

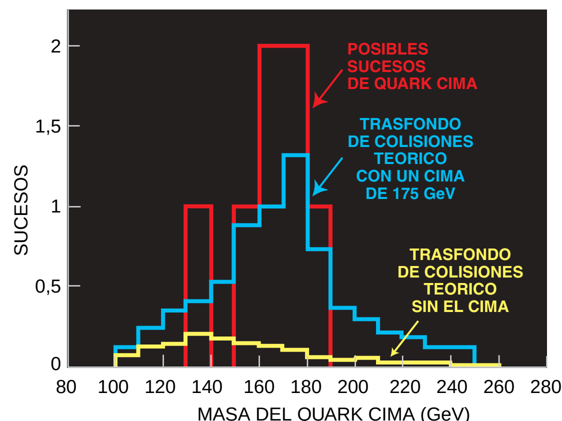
Del billón, más o menos, de colisiones producidas en el CDF nos habíamos quedado con 12 sucesos en los que parecía que se había creado un par cima-anticima. Pero había otros procesos físicos dispuestos a arrogarse la paternidad de ese suceso, por lo que debíamos calcular su probabilidad. La de que el trasfondo de colisiones fuese el único causante de esos 12 sucesos era de alrededor de uno en 400. Quedaba, pues, una pequeña posibilidad de que no se hubiera observado ningún quark cima.

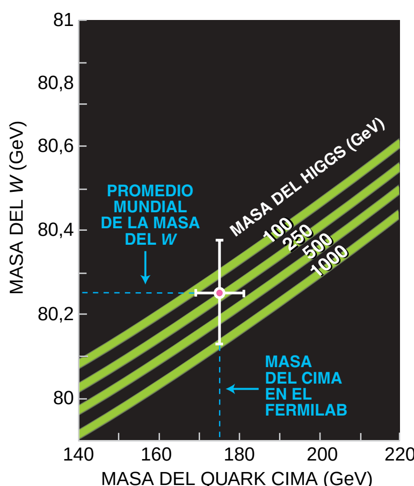
Sometimos los 12 sucesos a un análisis exhaustivo. Uno de los trabajos fundamentales era la "reconstrucción" de la masa del quark cima. Sumando las energías de los chorros y leptones emitidos por (se suponía) un par cima-anticima podíamos llegar a un valor de la masa del quark cima. Si los sucesos se habían generado realmente por ese par, las masas que dedujésemos deberían apiñarse en torno a un solo valor, la verdadera masa del quark cima. Si, por contra, los sucesos los había producido el trasfondo de colisiones, la distribución tendría que ser mucho más amplia. La masa se apiñó en un estrecho intervalo alrededor de unos 175 GeV. Para muchos de nosotros ésta era una prueba convincente de que el trasfondo de colisiones no nos estaba engañando.

Pensamos en un principio escribir cuatro artículos, uno por cada tipo de análisis y otro con un resumen de los resultados. En la siguiente reunión plenaria del equipo, los cuatro grupos encargados de redactar los artículos los presentaron a los demás miembros. Nos acribillaron sin piedad: los artículos eran incompletos, el cuadro que pintaban no era coherente. Abandonamos la idea de los cuatro artículos y un grupo restringido (al que pertenecíamos los dos) se puso a trabajar en uno solo.

El proceso fue durísimo. Para cada expresión había tantas opiniones cuantos sujetos. Cuesta satisfacer a 400 redactores en jefe. Por si fuese poco, meses más tarde, cuando nos acercábamos al punto y final, nos llegaron correcciones de hasta fuera del equipo. Tras largo debate, se decidió que el resultado no se presentaría como un descubrimiento sino que se expondría como una aproximación, un indicio de la existencia del quark cima. El 22 de abril de 1994, remitimos el artículo para su publicación.

Guardamos a buen recaudo todos los borradores y la documentación en un subdirectorio del ordenador de nuestra secretaria; lo llamamos la "olla". Como cabía esperar, una clave tan débil no hizo mucho por esconder nuestros secretos. Justo antes del anuncio, dos becarios posdoctorales enviaron una parodia de artículo teórico a un tablón de anuncios electrónico. Basándose en una teoría disparatada, "predecían" la masa del cima: el valor del CDF hasta el último decimal. Hacían saber que esperaban ofertas de trabajo.





2. LA RECONSTRUCCION de la masa del quark cima (*arriba*) a partir de los 12 primeros sucesos del CDF se apiña alrededor de 175 GeV. Pero la precisión con que se conocen las masas del cima y del *W* no basta (*abajo*) para predecir la masa de la partícula de Higgs. Podría estar entre 100 y 1000 GeV.

Pocos días después de haber remitido para su publicación el artículo del CDF celebramos un seminario y una rueda de prensa en el Fermilab para anunciar los hallazgos. También presentaron sus resultados los del D0/. Aunque sus resultados eran compatibles con los del CDF, no mostraron pruebas muy sólidas de la detección de quarks cima, salvo un suceso excepcional que registraron al principio de sus investigaciones, pero el grupo había previsto que la masa del quark cima sería pequeña y, en consecuencia, no habían diseñado de forma óptima su búsqueda.

En unas semanas el equipo del D0/ había acabado sus reanálisis (para un quark cima más pesado) y estaba además observando nuevos signos de su existencia. Los dos grupos emprendieron la toma de más datos. Para confirmar el hallazgo necesitábamos al menos el doble de sucesos en que se hallara involucrado el quark cima. Se instaló en el CDF un nuevo detector de vértices con técnica de silicio, en sustitución del viejo, dañado por la radiación. Tuvimos que familiarizarnos con sus peculiaridades, pero al final este aparato funcionó mejor que el primero. Ideamos un nuevo algoritmo para la detección de quarks cima con el detector de vértices aprovechando la larga experiencia adquirida. Cuando conseguimos datos suficientes, los procesamos con el algoritmo refinado. No tardamos en comprender que teníamos el quark cima.

Las presentaciones finales, el 2 de marzo de 1995, aportaron pruebas abrumadoras de la detección del quark cima tanto por el CDF como por el D0/. Los dos equipos comunicaron una probabilidad de menos de uno en 500.000 de que sus posibles quarks cima pudiesen explicarse sólo por el trasfondo de colisiones.

Desde entonces hemos obtenido más de 100 sucesos. También hemos hecho búsquedas provisionales de fenómenos que trascienden el modelo estándar. La masa grandísima del cima —el valor actual es 175,6 GeV— da a entender que quizá sea diferente de los otros quarks, y ahí reside la esperanza de que nos pueda llevar más allá del modelo estándar, que, aunque funciona, deja muchas cosas sin explicar.

En el modelo estándar la interacción débil, cuyos vehículos son las partículas *W* y *Z*, y la electromagnética, transmitida por los fotones, se unifican en una sola interacción "electrodébil" a energías muy altas, dadas sólo en los instantes iniciales

del universo. En el mundo de baja energía donde vivimos las interacciones electromagnética y débil evidencian una naturaleza muy distinta. No se conoce el mecanismo que causó la "ruptura" de su simetría inicial, pero en el modelo más sencillo la produce una nueva partícula, la partícula de Higgs.

A energías muy grandes, cuando existe la simetría, las partículas *W* y *Z*, los fotones, los leptones y los quarks carecen de masa. A energías menores, cuando la simetría se rompe, *W* y *Z* interaccionan con la partícula de Higgs y adquieren masa; en el proceso la recaban también quarks y leptones. Pero mientras las masas de *W* y *Z* se calculan con el modelo estándar, las de los quarks y los electrones se insertan en él mediante unos parámetros ajustables que describen la intensidad con la que cada quark o leptón interacciona, o se "acopla", con la partícula de Higgs.

Para el electrón, que es muy ligero, la intensidad de la interacción es 3×10^{-6}. Para el quark cima es casi exactamente uno. Este acoplamiento bastante intenso con la partícula de Higgs, y en cierta forma la magia del número uno, dan a entender que el quark cima podría desempeñar un papel especial. No sabemos cuál. Su gran masa le convierte en el quark que, por lo que se refiere a las interacciones con otras partículas, más influye. Una medición muy precisa de la masa del quark cima, por ejemplo, junto con la de *W*, conduciría a una predicción de la masa de la partícula de Higgs.

Hay formas de romper la simetría de la teoría electrodébil que no necesitan de una partícula elemental de Higgs. Una de las teorías propuestas la reemplaza por un par cima-anticima, y predice la existencia de nuevas partículas pesadas que se desintegrarían en pares de cima y anticima. Este efecto podría incrementar el ritmo de producción de los quarks cima.

En razón de su masa ingente, las desintegraciones del quark cima constituyen un campo abonado para la búsqueda de partículas nuevas. Hay quienes sospechan que unos cuantos de los sucesos reunidos por el CDF encierran partículas supersimétricas. La supersimetría es un tipo de simetría que asigna a cada partícula del modelo estándar unos compañeros todavía por descubrir. Si existen y son más ligeros que el quark cima, podrían aparecer en los sucesos asociados a éste. Por ejemplo, la desintegración de un quark cima ("top") podría producir su propio compañero supersimétrico (el "stop"). O, gracias a la supersimetría, se generarían pares de cima y anticima por la desintegración de un gluino (el compañero hipotético del gluon). Hasta podrían anularse entre sí estos efectos; en cuyo caso no se apreciaría cambio neto alguno en la producción observada de cimas y anticimas.

La supersimetría no predice una sola partícula de Higgs, sino una familia de cuatro o más. Si existiesen y fuesen más ligeras que los quarks cima podrían aparecer en las desintegraciones de éstos. Tanto el CDF como el DØ han puesto en marcha búsquedas de estas partículas hipotéticas, hasta ahora sin resultado.



3. UNOS 1000 FISICOS e innumerables técnicos, entre el equipo del CDF y el del DØ, contribuyeron al descubrimiento del quark cima. Las primeras páginas de las respectivas comunicaciones del descubrimiento sólo incluyen nombres.

Otra cuestión crítica es si los quarks, sobre todo el cima, de tanta masa, constituyen en realidad partículas elementales sin estructura interna. Hace poco el CDF midió la tasa de creación de chorros de gran energía en el colisionador del Fermilab; se comprobó que superaba lo imaginado. Gracias a las dispersiones de gran energía en ángulos amplios (como la dispersión de Rutherford, que descubrió que el átomo tenía un núcleo) se vislumbra la estructura de los objetos que chocan. Una interpretación posible de nuestros resultados es que los chorros "excedentes" se deben a las colisiones de objetos aún menores existentes dentro de los quarks y no observados todavía por ningún otro experimento.

A una conclusión tan radical, que cambiaría por completo la teoría de los quarks, sólo llegaríamos si excluyésemos cualquier otra posibilidad. Que la producción de chorros parezca "excesiva" podría obedecer a sutiles errores de las predicciones. Estamos explorando las posibilidades; los datos favorecen de momento una de esas explicaciones. Por ahora hemos de concluir que el quark cima, aunque tenga una masa tan grande, es una partícula fundamental, sin partes constituyentes.

El acelerador del Fermilab se encuentra en fase de renovación. El equipo del CDF y el del DØ están refinando los detectores. Volveremos a tomar datos en 1999. Gracias a las mejoras del acelerador, los quarks cima se producirán a un ritmo veinte veces mayor; con el refinamiento de los detectores, se registrarán sin ambages. Eso significa que se hallarán los quarks cima a un ritmo 30 veces superior que lo conseguido hasta entonces, lo que permitirá estudiar con mayor detalle sus características. El Gran Colisionador de Hadrones del CERN empezará a funcionar hacia el 2006. Producirá dos haces de protones que chocarán a 14 TeV (tera, o 10^{12}, electronvolts) —siete veces la energía del Fermilab—, y así se generará casi un par cima-anticima por segundo.

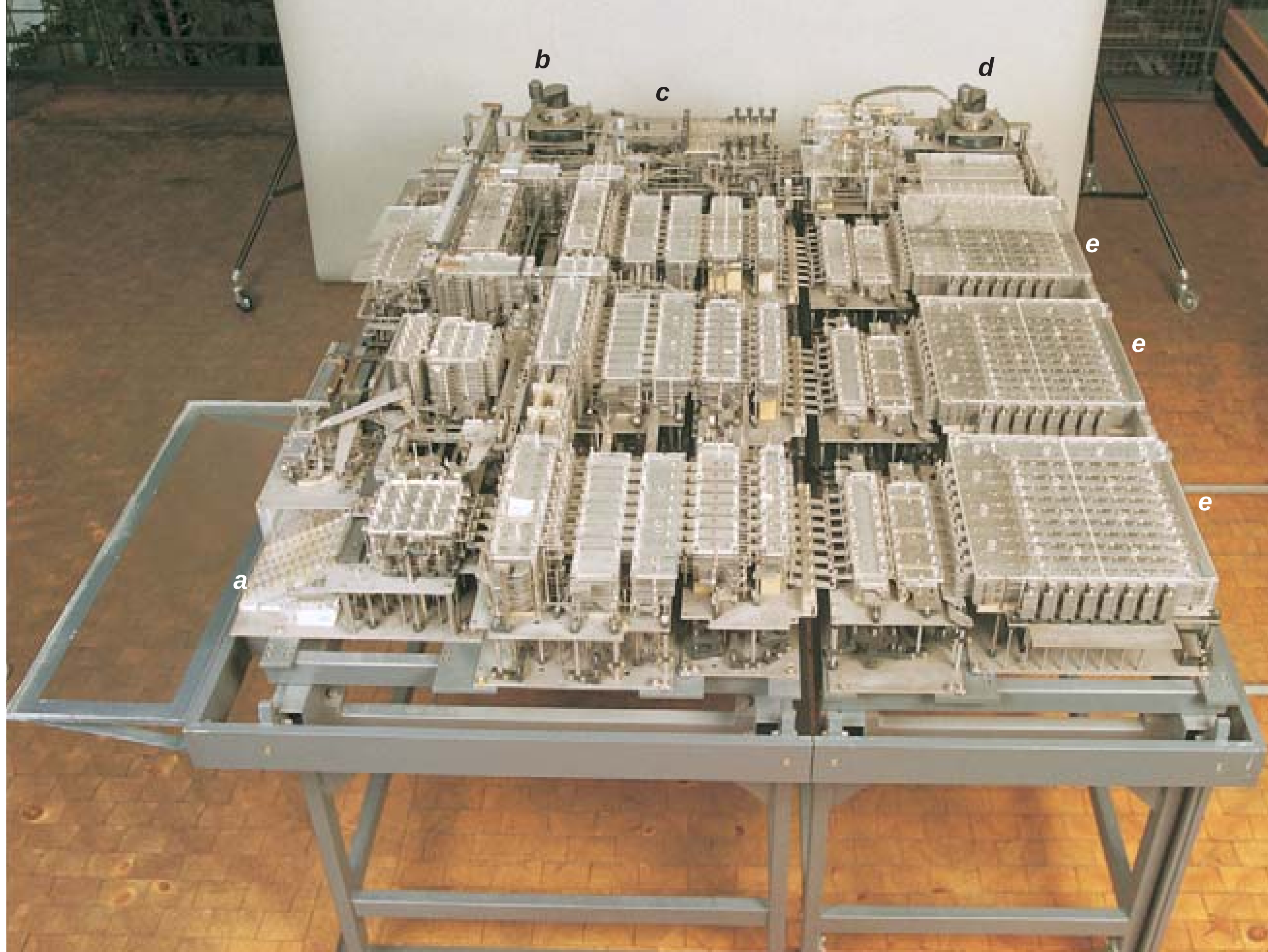
Dentro de unos pocos años el quark cima servirá para buscar la solución de las preguntas que siguen en el aire acerca de la materia y de las fuerzas que rigen el mundo físico. Qué nuevos principios de la física surgirán más allá de lo que ahora sabemos es pura cábala.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

OBSERVATION OF TOP QUARK PRODUCTION IN $p\bar{p}$ COLLISIONS WITH THE COLLIDER DETECTOR AT FERMILAB. F. Abe *et al*. en *Physical Review Letters*, vol. 74, n.º 14, págs 2626-2631; 3 de abril de 1995.

OBSERVATION OF THE TOP QUARK. S. Abachi *et al.*, id., págs. 2632-2637.

TOP-OLOGY. Chris Quigg en *Physics Today*, vol. 50, n.º 5, págs. 20-26; mayo de 1997.



Los ordenadores de Konrad Zuse

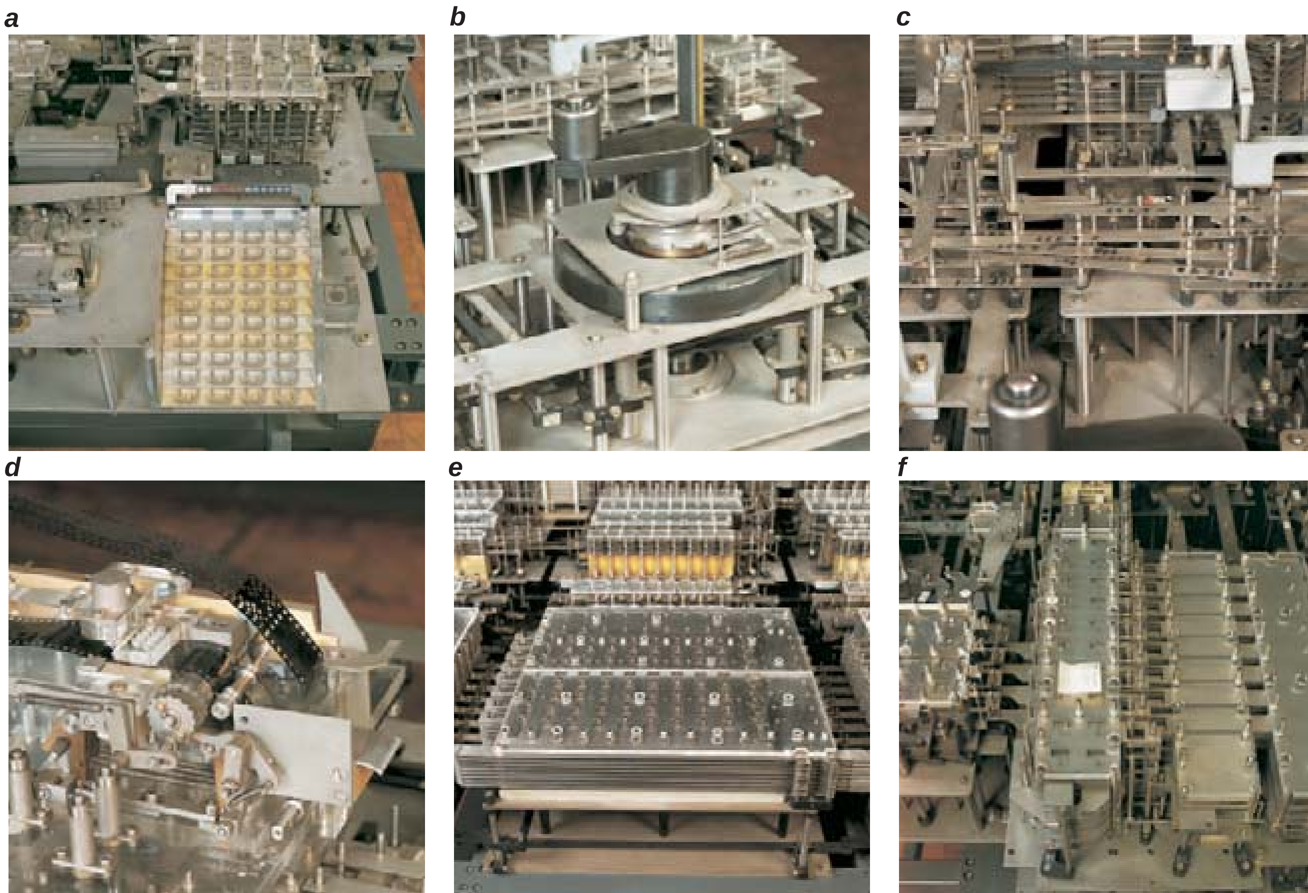
Entre 1936 y 1941 este famoso inventor alemán construyó en Berlín dos máquinas de cómputo a las que llamó Z1 y Z3. Aunque el diseño lógico de ambas era muy similar, creó la primera con componentes mecánicos y la Z3 con relés telefónicos

Raúl Rojas

Desde hace años se viene discutiendo sobre la fecha y el lugar en donde se inventó el ordenador universal. Ciertas instituciones de los Estados Unidos celebraron en 1996 las bodas de oro, en conmemoración de que se cumplían 50 años de la presentación pública del ENIAC (*Electronical Numerical Integrator and Computer*). Esta máquina fue en su época el ordenador más rápido. De ahí que la prensa la considerase durante muchos años el primer ordenador del mundo. La verdad es que los propios norteamericanos han ignorado el trabajo de otros compatriotas, así John Atanasoff (1903-1995), o no han otorgado la debida importancia a las invenciones de extranjeros, como ha sucedido con Konrad Zuse (1910-1995).

En este artículo me propongo analizar la estructura lógica de las máquinas de cómputo creadas por Zuse. Me ocuparé, sobre todo, de la estructura de dos de sus primeras creaciones, la Z1 y la Z3, que llama la atención por su sorprendente actualidad cuando se las compara con la estructura de procesadores construidos hasta hace pocos años. Para realizar este trabajo, conté con la ayuda directa de Zuse. En 1995 me entregó, fotocopiada, la documentación que había adjuntado a la solicitud de patentes en los años de la segunda guerra mundial.

Quienes estén familiarizados con la estructura de ordenadores reconocerán de inmediato en la arquitectura de las máquinas de Zuse conceptos que, por su importancia, se han convertido en poco menos que dogma. Me refiero, por ejemplo, a la separación del procesador de la memoria, la utilización del sistema binario, etcétera. Para ponderar la visión de su autor, téngase presente que Zuse avanzó tales conceptos en 1936, el



1. EL ORDENADOR MECANICO Z1. Se reconstruyó bajo la dirección del propio Konrad Zuse, basándose en algunas notas y en la todavía portentosa memoria de su provecto inventor. La máquina original se destruyó en la guerra. De la talla de un piano de cola, Z1 consta de varias estructuras metálicas que pueden separarse para el transporte. Los movimientos de los componentes se transmiten de una estructura a otra a través de acoplamientos mecánicos. El operador puede alimentar un número decimal en el ordenador tirando de las piezas metálicas (*a*) que corresponden a las cifras decimales, el exponente y el signo del número. Para mostrar un resultado numérico se activan pequeñas láminas. A un lado de la unidad de entrada y salida se encuentra el mecanismo que transforma un número decimal en otro binario, y viceversa. Por medio de una manivela (*b*), que se puede operar manualmente o con un motor, se transmiten los movimientos necesarios a todas las partes mecánicas; cada giro de la manivela corresponde a un ciclo de máquina. Muchas barras (*c*) transmiten los movimientos de la manivela a otras partes de la máquina, a tenor de la instrucción que se esté ejecutando. El programa se lee de una cinta perforada de 35 mm, como las usadas en cinematografía. La unidad de lectura (*d*) hace avanzar la cinta perforada un puesto cada vez que se lee una instrucción, decodifica la instrucción e inicia las operaciones correspondientes. Los tres bloques idénticos (*e*) de la derecha constituyen la memoria, capaz de almacenar 64 números: un bloque es para el exponente y dos para la mantisa. Cada bloque contiene 7 bits. Para leer un número de una dirección de memoria se activan los elementos mecánicos correspondientes. Los datos fluyen hacia el procesador utilizando un componente (*f*) que Zuse consideraba similar a las vías de un ferrocarril. Pese a que en la reconstrucción se dispuso de instrumentos de precisión, la máquina se encallaba a veces. Zuse adivinaba en seguida dónde residía el fallo, dónde bastaba oprimir con el dedo para que la operación continuara. La réplica que mostramos, terminada en 1989, se encuentra en el Museo Alemán de la Técnica en Berlín.

año en que tuvo listo el prototipo de la memoria de la Z1.

Por esa misma fecha, Alan M. Turing (1912-1954) preparaba el primer borrador de una artículo que revolucionaría la matemática; en él se formaliza el concepto intuititivo de "computabilidad". Turing definió para ello una máquina ideal: sólo los problemas numéricos resolubles con esta máquina pueden denominarse problemas computables. Una máquina de Turing consta de una banda infinita que almacena ceros y unos (una memoria) y un pequeño procesador capaz de leer y modificar una sola cifra binaria a la vez. Turing demostró que esa máquina tan primitiva podía operar como máquina universal, es decir, como un autómata capaz de simular cualquier otra máquina de Turing. Para ello se debe preparar la banda-memoria con dos tipos de contenido: los datos del problema a resolver y lo que hoy llamaríamos el programa para realizar el cálculo.

Por tanto, en 1936 no surgió el ordenador en el sentido material y moderno del término, pero sí quedó formulado claramente su concepto. En el mundo de la teoría se había inventado el ordenador universal.

Zuse no era matemático. Tampoco se ocupó nunca de definir la computabilidad de manera teórica. No conocería los escritos de Turing hasta muchos años después de haber realizado su propio trabajo. A él, que procedía del ámbito de la praxis, lo que le interesaba era facilitar el cálculo de largas cadenas de operaciones. Gracias a su formación en ingeniería y a su habilidad para estructurar sistemas complejos partiendo de componentes simplísimos reparó en

Notación en coma flotante

El número decimal 18,73 es una forma abreviada de expresar

$$1 \times 10^{1} + 8 \times 10^{0} + 7 \times 10^{-1} + 3 \times 10^{-2}.$$

De manera similar, el número binario 10,11 se interpreta mediante la descomposición

$$1 \times 2^{1} + 0 \times 2^{0} + 1 \times 2^{-1} + 1 \times 2^{-2}.$$

Cualquier número (excepto el cero) se puede expresar en la forma $\pm a \times 2^{b}$. El exponente b es un número entero y la mantisa a un número entre 1 y 2. Un ejemplo podría ser $a = 1{,}11$ y $b = 2$. El número binario 1,11 expresado en forma decimal es 1,75, ya que $1 \times 2^{0} + 1 \times 2^{-1} + 1 \times 2^{-2} = 1{,}75$. Esa es la razón por la que en este ejemplo $a \times 2^{b}$ representa al número 7 que es igual a $1{,}75 \times 2^{2}$.

Zuse reservó siete bits para el exponente (*de color rojo en el diagrama*). Con siete bits pueden representarse los enteros de 0 a 127. Sin embargo, Zuse decidió utilizar el “complementario de dos”, representación en la que el bit no tiene en la posición más alta un peso de $64 = 2^{6}$ (como sería el caso en una representación binaria normal) sino de –64. De ese modo se puede, pues, representar con siete bits todos los exponentes enteros desde –64 hasta –63.

Zuse utilizó para la mantisa 15 bits (*verde*) y un bit adicional para el signo (*azul*). Todas las cifras se normalizan antes de retenerse en la memoria; la única cifra binaria antes de la coma será 1. Este bit no necesita almacenarse en memoria (siempre es 1); por eso se requieren sólo 14 bits para guardar una mantisa en la memoria. Cuando el procesador lee la mantisa de la memoria, basta agregar la cifra 1 antes de la coma decimal.

±	Exponente	Mantisa
0	0000100	0001110100110

La cifra mostrada en nuestro ejemplo es positiva (el bit de signo es 1), posee el exponente 100 binario (igual al 4 decimal) y la mantisa 1,000 111 010 001 10 (=1,1136 en decimal, utilizando sólo cinco cifras). El número decimal representado por este exponente y mantisa es entonces $1{,}1136 \times 2^{4} = 17{,}818$.

Hay un problema con este tipo de representación: el número cero no puede expresarse con la notación normalizada, ya que la mantisa nunca puede ser igual a cero. Por eso Zuse decidió adoptar una convención especial: cualquier número de la forma $a \times 2^{-64}$ se interpreta como cero. En Z3 hay los circuitos necesarios para identificar este caso especial y acometer los cálculos correctos. Otro caso especial es el de cualquier número con exponente +63, que se interpreta como infinito o menos infinito, de acuerdo con el signo de la mantisa.

Para ponderar la visión anticipadora de Zuse, basta comparar sus convenciones numéricas con la norma para operaciones de coma flotante definida por el Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE). La notación del IEEE es muy similar a la notación semilogarítmica utilizada por Zuse (con ciertas diferencias en la codificación de los exponentes y en los casos especiales considerados).

la posibilidad de construir autómatas programables.

Su primer intento en esta dirección fue la Z1 (*véase la figura 1*), un aparato casi totalmente mecánico, capaz de ejecutar las cuatro operaciones aritméticas (suma, resta, multiplicación y división) en cualquier secuencia y con números almacenados en una memoria. Cuando terminó la Z1 en 1938, comprobó que los componentes mecánicos no eran del todo fiables y decidió adoptar otra técnica, la de relés electromagnéticos.

Tras algunos ensayos con una máquina híbrida, la Z2, Zuse construyó un nuevo prototipo, la Z3, que en 1941 ya operaba. Desde el punto de vista lógico remedaba la Z1. Los algoritmos numéricos y la codificación de los números eran los mismos. En cierta medida Z3 venía a ser una Z1 fiable. En sólo cinco años el inventor berlinés había hecho realidad su intuición visionaria de 1936. Considerado desde la perspectiva de los proyectos paralelos en Norteamérica, que contaron desde el principio con recursos ilimitados (piénsese en el ENIAC), lo logrado por Zuse resulta todavía más admirable.

Los prototipos originales de ambas máquinas se destruyeron durante la segunda guerra mundial. Zuse reconstruyó en 1966 la Z3 y, en el bienio de 1987-1989, la Z1. Ambas reconstrucciones, que ahora operan parcialmente, se exhiben en las exposiciones de los museos de ciencia de Berlín y Munich.

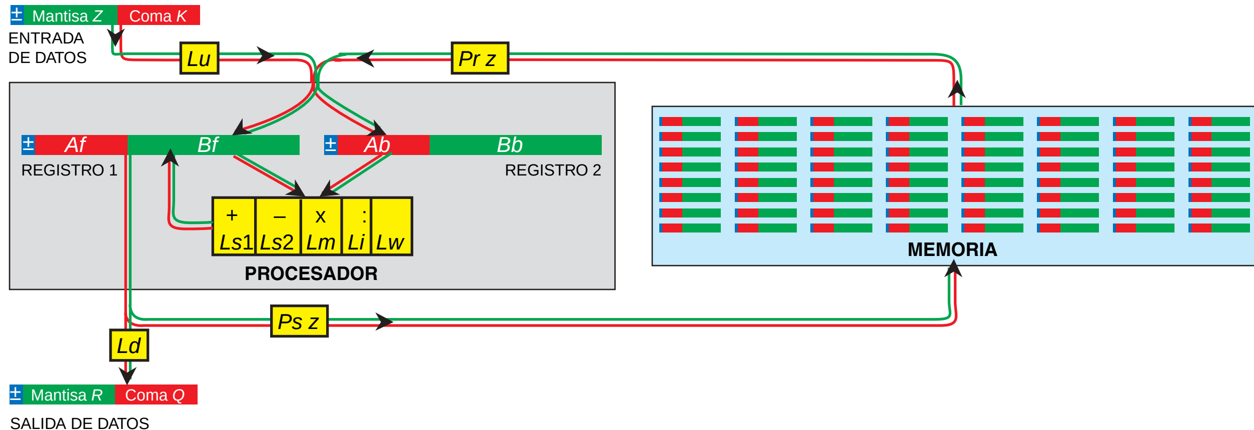
La primera decisión adoptada por Zuse apunta ya hacia la estructura de los ordenadores modernos: sus máquinas operan en sistema binario. En la representación binaria sólo existen las cifras 0 y 1. Cada componente mecánico o eléctrico capaz de adoptar dos estados distintos puede servir para representar una cifra binaria. En el caso de la Z1 se utilizan finas barras metálicas que proceden hacia adelante o hacia atrás (a lo largo de la barra). En el caso de la Z3 se utilizan relés electromagnéticos: 600 para el procesador y 1400 para la memoria (*véase la figura 2*).

La elección de la base 2, que hoy nos parece obvia y natural, no era la única opción discutida en aquella época. Los computadores Mark I y ENIAC, construidos pocos años después en los EE.UU., trabajaban con una representación decimal. El ENIAC, máquina electrónica, utilizaba una cadena de 10 tubos de vacío para codificar cada dígito. Sólo el tubo que correspondía a la cifra representada se apagaba; todos los demás permanecían encendidos.

La representación binaria, sin embargo, es mucho más fácil de manipular, lo mismo con componentes mecánicos que electrónicos. Además, argumentaba Zuse, en el ordenador los números están sólo en relación “consigo mismos” y el operador no necesita poder seguir cada paso de un cálculo. Basta con que el resultado final de la cadena de operaciones sea correcto y se pueda transformar al sistema decimal.

La memoria de la Z3 puede almacenar 64 números de 22 bits. Igual que las memorias modernas, posee una estructura repetitiva bastante sencilla de construir. Pero Zuse optimizó el procesador con muchas ideas novedosas y por eso es mucho más complejo. El procesador puede ejecutar las cuatro operaciones básicas

Programación de Z3



Desde el punto de vista del programador, el procesador de la máquina Z3 contiene dos registros de coma flotante (R1 y R2). El programador no necesita saber que Zuse los llamaba registros *f* y *b* y que además en el procesador existe un registro temporal adicional llamado *a* (*véase la figura 4*). La primera instrucción de un programa que lee de la memoria carga el número leído en el registro R1 (si es un número que viene del teclado decimal, lo carga después de convertirlo en número binario). Cualquier instrucción de lectura posterior se carga en el registro R2. Esto continúa mientras no se borre el registro R1.

Z3 se programa con las nueve instrucciones siguientes (en la primera columna tenemos el nombre que Zuse le dio a la instrucción, en la segunda su codificación binaria):

Entrada y salida:

Lu	01 110000	lee del teclado
Ld	01 111000	despliega el resultado

Memoria:

Pr z	11 $z_6z_5z_4z_3z_2z_1$	carga de la dirección *z*
Ps z	10 $z_6z_5z_4z_3z_2z_1$	almacena en dirección *z*

Aritmética:

Ls_1	01 100000	adición
Ls_2	01 101000	substracción
Lm	01 001000	multiplicación
Li	01 010000	división
Lw	01 011000	raíz cuadrada

Las operaciones aritméticas utilizan como argumentos los registros R1 y R2 (la raíz cuadrada emplea sólo el registro R1) y almacenan el resultado en el registro R1. Después de transferir un resultado a la memoria, los registros se borran y tienen que cargarse de nuevo.

Un programa para Z3

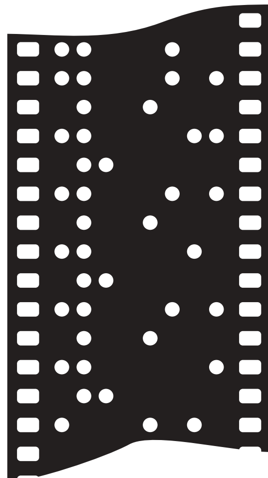
Un problema frecuente en aritmética es el de calcular un polinomio

$$a_4x^3 + a_3x^2 + a_2x^1 + a_1.$$

Con mayor propiedad, esto es, con el método de Horner, podemos expresar el cálculo anterior así:

$$x(a_2 + x(a_3 + xa_4)) + a_1.$$

Suponga que en las direcciones 1, 2, 3 y 4 de memoria hemos almacenado con anterioridad las constantes a_1, a_2, a_3 y a_4. En la dirección 5 hemos almacenado *x*. El programa mostrado abajo realiza el cálculo deseado (por razones mecánicas las ocho perforaciones de la cinta que representan cada instrucción no estaban colocadas en una sola fila. En nuestro diagrama hemos simplificado).



Pr 4	carga a_4 en Registro 1 (R1)
Pr 5	carga *x* en Registro 2 (R2)
Lm	multiplicación, resultado en R1
Pr 3	carga a_3 en R2
Ls_1	suma R1 y R2, resultado en R1
Pr 5	carga *x* en R2
Lm	multiplicación, resultado en R1
Pr 2	carga a_2 en R2
Ls_1	adición, resultado en R1
Pr 5	carga *x* en R2
Lm	multiplicación, resultado en R1
Pr 1	carga a_1 en R2
Ls_1	adición, resultado en R1
Ld	despliega resultado

RAUL ROJAS es catedrático de inteligencia artificial en la Universidad Libre de Berlín. Estudió matemáticas y física en México. Posteriormente obtuvo su doctorado y habilitación en la Universidad Libre. Trabajó durante algunos años en los Laboratorios Nacionales de Computación y Matemáticas de Berlín en un proyecto de ordenadores simbólicos. Desde 1989 investiga en el área de redes neurales. El autor conoció a Konrad Zuse en Berlín y fue en una de esas conversaciones cuando surgió la idea de analizar la estructura y las patentes de la Z1 y Z3.

de la aritmética y extraer la raíz cuadrada de un número. La máquina se controla con una cinta perforada en la que ocho perforaciones codifican cada operación (*véanse las figuras 1d y 2b*). Una vez inicializada la máquina, el programa se ejecuta automáticamente hasta el final. La Z3 no es muy rápida De acuerdo con los parámetros actuales, la Z3 procede con exasperante lentitud: en realizar una multiplicación tarda tres segundos interminables.

Zuse no solamente adoptó el sistema binario, sino que además decidió que sus máquinas operarían con números de coma flotante. Igual que se representan fracciones a través de números decimales, se puede escribir números binarios con cifras antes y después de la coma. Las posiciones antes de la coma indican las potencias 2^0, 2^1, 2^2, etcétera, mientras que las posiciones después del punto señalan las potencias 2^{-1}, 2^{-2}, etc. La representación binaria del número 1/2 es $0{,}1 = 2^{-1}$; la del número 1/4 será $0{,}01 = 2^{-2}$. El número 3/4 tiene la representación binaria fraccionaria 0,11 (*véase el recuadro*).

En el sistema decimal, cuando se opera con números de muy diferentes magnitudes se les escribe como el producto de un número de magnitud restringida, la mantisa, y una potencia de 10. Con esta convención la velocidad de la luz, por ejemplo, es de 3×10^8 metros por segundo y la masa del protón es de $1{,}6724 \times 10^{-24}$ gramos. Con semejante recurso no sólo nos ahorramos muchos ceros, sino que, además, posibilitamos que una máquina que sólo opera con menos de 8 o bien 24 posiciones decimales realice cálculos con ambos números. Para reducir el número de posiciones decimales necesarias y aprovechar esta representación al máximo, hay que "normalizar" los números. Esto significa que antes de la coma decimal ha de haber una sola cifra. Así, podemos expresar el número 8731 mediante la notación $8{,}731 \times 10^3$. En el sistema binario la mantisa está normalizada si representa a un número mayor o igual a 1, aunque menor que 2. El único bit a la izquierda de la coma decimal distinto de cero es el primero. El número 1,01, por ejemplo, está normalizado, mientras que el número 10,1 no lo está. Esta es la convención empleada por Zuse.

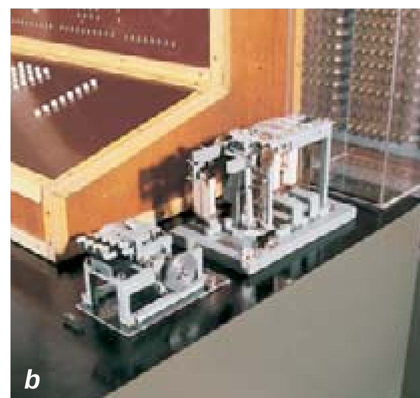
En la memoria de la Z3 se almacenan las mantisas utilizando 14 bits para todas las posiciones de la derecha de la coma. El 1 que precede a la coma no precisa almacenarse, sino que se agrega al transferir un número de la memoria hacia el procesador. El procesador emplea dos bits adicionales en las posiciones más bajas para aumentar la exactitud de los cálculos numéricos. Los ordenadores modernos recurren a una técnica similar para minimizar errores de redondeo.

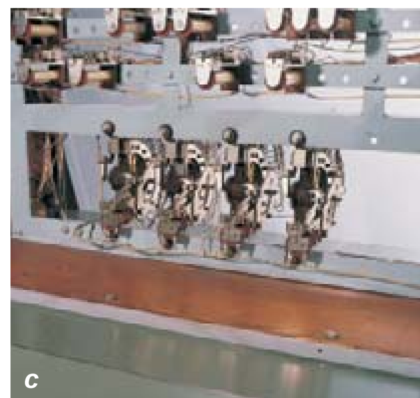
Los datos para un cálculo se pueden leer a través de un teclado. Se pueden teclear cuatro dígitos para la mantisa (*véase la figura 1b*) y se puede seleccionar un exponente entre –8 y 8 (oprimiendo el botón adecuado en una hilera de botones). El número 4,356 se puede alimentar en la Z3 tecleando la mantisa 4356 y seleccionando el exponente –3. La computadora Z3, al leer este número, lo transforma de la representación decimal en la binaria. Los cálculos posteriores se realizan en binario.

Una vez que deseamos ver el resultado final, la representación binaria interna se convierte en un número decimal con una mantisa entre 0 y 19999; los dígitos correspondientes, así como el exponente, se muestran iluminando una matriz de lamparitas en la consola de control.

La memoria, la unidad aritmética, la unidad de control para las instrucciones y las unidades de entrada y salida de datos numéricos constituyen los principales componentes del tipo de ordenadores construidos por Zuse. La máquina se controla por medio de una cinta perforada de película de 35 mm. Una cabeza lectora lee el código binario expresado por ocho posiciones (perforadas o no) de la cinta. Allí donde hay una perforación, se cierra un contacto eléctrico; donde no la hay, no fluye corriente. Un decodificador inicia la ejecución



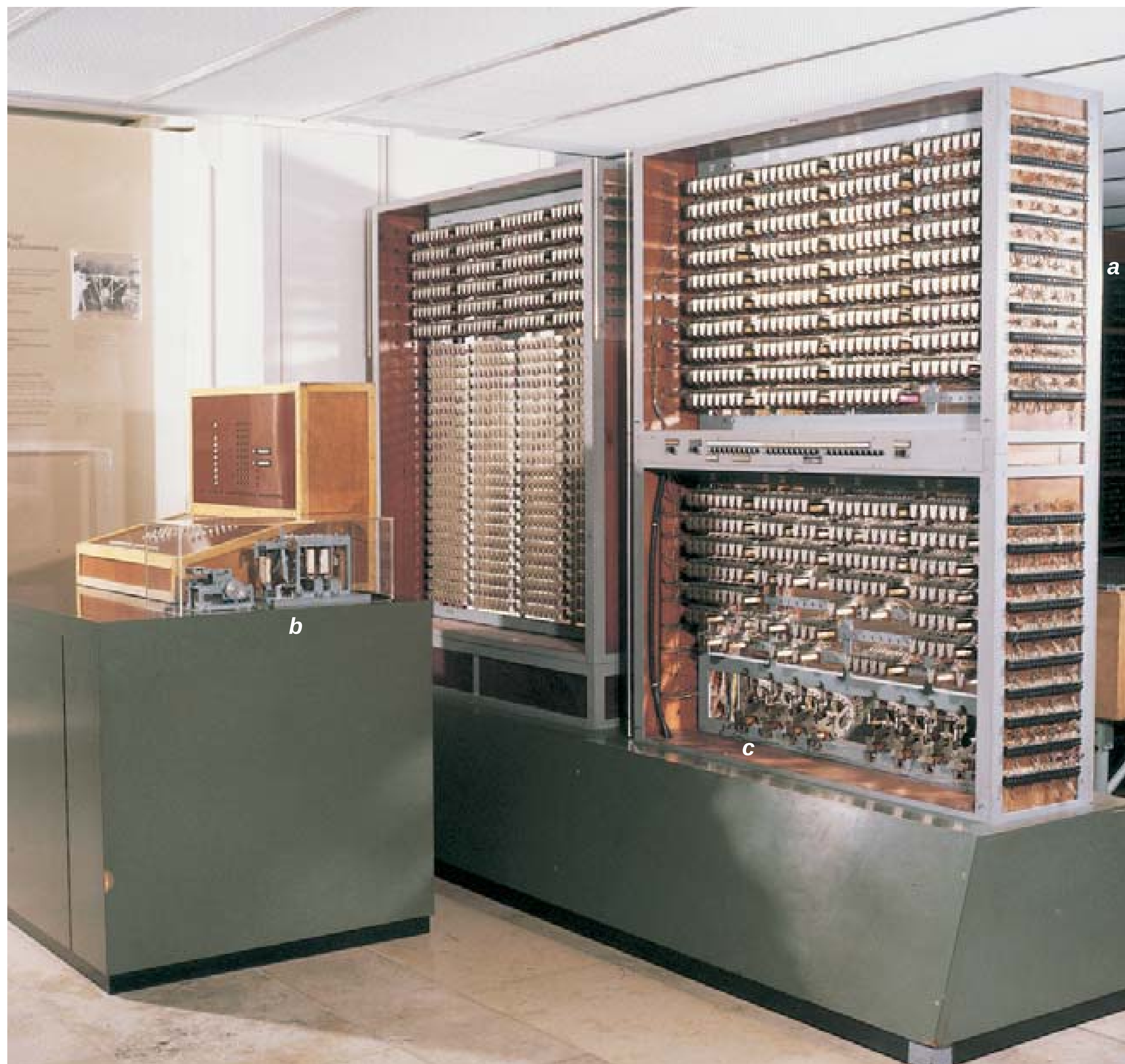




2. MAQUINA Z3. Se construyó con relés. Tras la consola, el módulo de la izquierda contiene la memoria; el de de la derecha, el procesador. Los relés del procesador (*a*) están marcados con los nombres mencionados en el artículo.

de la instrucción cuyo código se ha leído. Al final de la ejecución de esta instrucción, la cinta perforada avanza una posición; la instrucción siguiente está lista para su ejecución.

El programador dispone de nueve instrucciones: dos para la entrada y salida de datos, dos para leer datos de la memoria o almacenarlos en ella y cinco para las operaciones aritméticas. La unidad aritmética contiene, desde la perspectiva del programador, dos palabras de memoria que llamamos registros R1 y R2. Todas las ope-



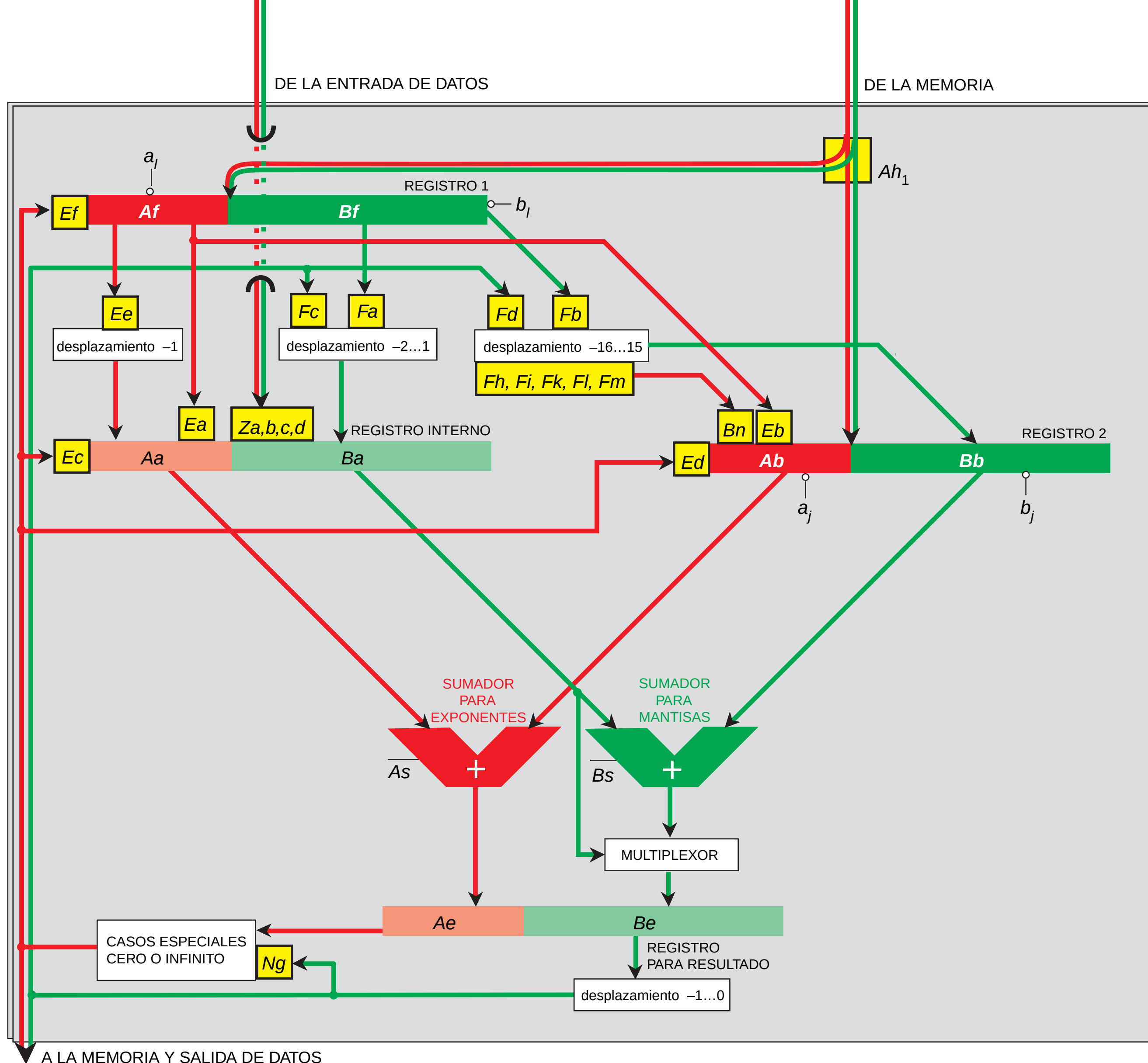
Para ejecutar las operaciones que requieren una secuencia de acciones elementales, Zuse empleó contactos circulares como los utilizados en la telefonía (*c*). En cada ciclo, el brazo móvil avanza un paso y activa el siguiente contacto, lo cual desencadena ciertas operaciones en la máquina. Los programas para Z3 se almacenan en cintas de 35 mm. La cinta se decodifica mediante una unidad de lectura (*b, en la parte posterior*): en donde hay una perforación se cierra un circuito eléctrico. Aquí ofrecemos la reconstrucción de la máquina terminada por Zuse en 1966; se exhibe en el Museo Alemán de la Técnica en Munich. El prototipo original se destruyó en la guerra.

raciones aritméticas se desarrollan sobre estos dos registros.

Cada instrucción de la computadora Z3 se descompone en operaciones elementales, que requieren un ciclo para su ejecución. En la máquina Z1 un ciclo equivale a una rotación de una manivela operada manualmente o de un motor eléctrico (*véase la figura 1b*). La instrucción *Pr* (leer de la memoria) puede realizarse en un solo ciclo; la adición y substracción requieren 3 o 5 ciclos; la multiplicación, división o extracción de la raíz cuadrada necesitan hasta 20 ciclos. Durante la ejecución de estas instrucciones se detiene el avance de la cinta perforada en el segundo ciclo, avance que sólo se reanuda cuando ha terminado la operación aritmética. La instrucción *Ps* (almacenar en la memoria) se puede traslapar con el ultimo ciclo de la operación aritmética previa; no consume, pues, tiempo de máquina.

Cada ciclo (Zuse utilizaba para estos conceptos una terminología propia) se divide en cinco pasos. La instrucción a ejecutar se decodifica en el paso I. Los argumentos para la operación se cargan en los registros durante los pasos IV y V. En el segundo ciclo, en los pasos I, II y III se suman o substraen los exponentes y mantisas (a tenor de la operación de que se trate). En los pasos IV y V se escribe el resultado de la operación en los registros adecuados.

La función de la unidad de control consiste en promover en el procesador las acciones adecuadas en el momento necesario. En el caso de instrucciones



que requieren varios ciclos y se iteran, se emplea un brazo mecánico que se desplaza sobre una carátula con contactos, a la manera de un reloj (*véase la figura 2c*). En cada paso, el brazo mecánico pasa corriente por los contactos a determinados relés y de esa manera se logra que todos operen en concierto. Este tipo de control rotatorio se puede comparar con los microprogramas de los procesadores modernos, que reducen una instrucción compleja a una serie de microinstrucciones, más sencillas.

Para la adición y la substracción existe un circuito de relés que las ejecuta directamente. Antes de comenzar una adición o substracción se comparan internamente los signos de los operandos y se decide si debe ejecutarse la operación contenida en el programa (cuando los signos de los operandos son iguales) o la operación inversa (cuando los signos son distintos).

La multiplicación consta de una serie de adiciones con desplazamiento de la mantisa. El procedimiento no difiere del tradicional papel y lápiz para números decimales. Ahora bien, puesto que se emplea el sistema binario la receta es mucho más sencilla ya que la tabla de multiplicar sólo contiene los números 1 y 0.

El cálculo comienza por igualar el resultado parcial a cero. En cada iteración del algoritmo se examina bit por bit del multiplicador, empezando por el bit más a la derecha. Si el bit examinado en el multiplicador es 1, se suma el multiplicando al resultado parcial; si es 0 no se suma. El nuevo resultado parcial se desplaza un sitio a la derecha y se continúa con la siguiente iteración.

La multiplicación opera con los 14 bits de la mantisa del multiplicando a la derecha de la coma y con el bit a la izquierda. El cálculo consume 16 ciclos (incluido un ciclo para preparar la operación). En tal operación se invierten, como dijimos antes, tres segundos. En cada ciclo de una multiplicación se ejecuta una adición: el resultado parcial se recircula para que sirva de argumento en la iteración siguiente. El multiplicando se mantiene durante toda la operación en el registro R2 y es el segundo argumento en cada adición (*figura 4*).

La división y la extracción de la raíz cuadrada se calculan de manera similar. Si bien en el caso de la división de lo que se trata es de substraer mantisas y desplazar el resultado parcial. El cociente se construye por iteración, bit a bit.

La raíz cuadrada q de un número x se construye también por iteración, de suerte tal que $x/q = q$. Por ello, puede calcularse la extracción de la raíz

3. LA ESTRUCTURA LOGICA de la unidad aritmética de Z3. Los flujos de datos están marcados con colores: rojo para el exponente y verde para la mantisa. Las rectángulos amarillos representan relés que funcionan como válvulas: al abrirse (o cerrarse) permiten (o impiden) el flujo de datos de un registro al otro. El relé *Ah1* tiene como función determinar si los datos que vienen de la memoria han de almacenarse en el registro R1 o en el registro R2 del procesador. Además de estos dos registros, en la figura se muestran otros dos: uno interno y otro para el resultado de las operaciones. Ambos registros quedan fuera de la vista del programador. Los registros R1 y R2 mantienen su contenido indefinidamente hasta que se borran (usando los contactos a_l, b_l, a_j, b_j) o se almacenan nuevos datos en ellos. Los componentes marcados con un símbolo de adición son los sumadores binarios. Se trata de los únicos componentes con los que se computan nuevos resultados. Cuando se activan los contactos *As* o *Bs* las unidades calculan la diferencia y no la suma de sus dos argumentos. En operaciones que requieren varios ciclos, la mantisa y el exponente circulan varias veces iterativamente en el procesador. El exponente tiene su propio circuito (*rojo*) y la mantisa el suyo (*verde*). En cada ciclo se les puede desplazar uno o más puestos hacia la izquierda o la derecha. El exponente, por ejemplo, se puede dividir entre dos, desplazándolo una posición hacia la derecha usando los contactos *Ee*. La mantisa se puede volver a normalizar después de una suma empleando el desplazador (*shifter*) mostrado en la parte inferior de la figura (–1 ... 0). Durante la multiplicación o división se requiere usar el desplazador que traslada la mantisa dos posiciones hacia la izquierda o una hacia la derecha (–2 ... 1). Después de una substracción puede ser necesario normalizar el resultado y requerir quizá de +16 a –15 desplazamientos (16 posiciones hacia la izquierda o 15 hacia la derecha). La corrección para el exponente se transmite a través de los relés *Fh, Fi, Fk, Fl, Fm*. Antes de que un resultado continúe circulando en el procesador, se verifica si no se trata de un caso especial (cero o infinito) y, si es así, se activan circuitos especiales que producen la codificación necesaria. Los datos decimales introducidos a través del teclado se transmiten al registro *Ba* vía las válvulas *Za, Zb, Zc* y *Zd*.

cuadrada siguiendo un algoritmo muy similar al de la división y haciendo uso de los mismos circuitos.

Algunas operaciones se complican al adoptar la notación de coma flotante. Ocurre así con la adición y substracción. Antes de sumar dos números de coma flotante hay que hacer coincidir la posición de la coma: los exponentes tienen que ser iguales. Pero si los exponentes son distintos, la mantisa del número con el exponente menor se desplaza hacia la derecha (incrementando cada vez el exponente) tantos sitios cuantos se precise para que el exponente menor se iguale con el exponente mayor.

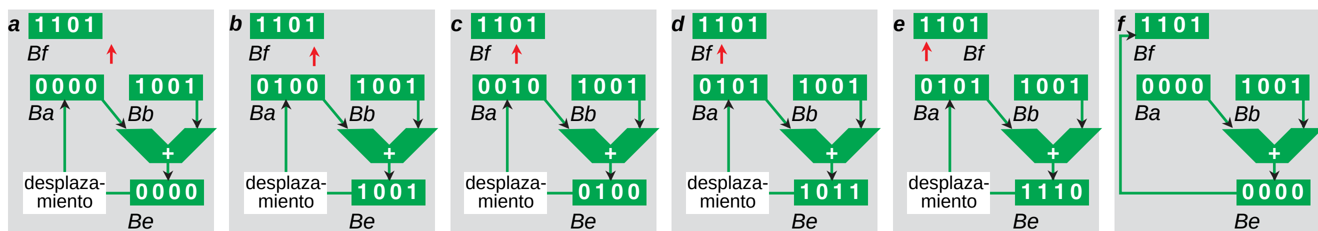
En el caso de la multiplicación, el procedimiento resulta más sencillo. Basta con sumar los exponentes y multiplicar las mantisas. En una división se substraen los exponentes y se dividen las mantisas.

Que la operación haya terminado no garantiza que el resultado esté normalizado. El producto de dos mantisas con valores entre 1 y 2 puede ser mayor que 2 (y eso significa que el segundo bit a la izquierda de la coma es 1). También puede suceder que al substraer dos números casi iguales aparezcan en la mantisa del resultado ceros en los primeros bits de izquierda a derecha. En ambos casos se debe desplazar la mantisa del resultado hasta que en el primer bit antes de la coma (y en ninguno más arriba) haya un 1. De acuerdo con la dirección del desplazamiento usado para normalizar la mantisa, habrá que sustraer, o sumar, al exponente el número de sitios corridos.

De lo anterior se infiere, pues, que la operación fundamental realizada en la máquina Z3 es la adición de exponentes y mantisas. La computadora necesita un ciclo para esta operación, lo mismo que los microprocesadores modernos. En el caso de operaciones cuyo resultado se obtiene por iteración, el resultado parcial atraviesa varios ciclos de procesador.

Por la época en que Zuse creaba sus prototipos, en Estados Unidos otros inventores desarrollaban proyectos similares. Entre 1938 y 1942 John Atanasoff construyó en la Universidad estatal de Iowa la máquina ABC (de Atanasoff-Berry Computer). De 1939 a 1944 Howard Aiken dirigió en la Universidad de Harvard el desarrollo de la máquina Mark I, mientras que en la Universidad de Pennsylvania J. Prespert Ecker y John W. Mauchly construían entre 1943 y 1945 el ENIAC. Resulta muy ilustrativo comparar las características de estos cuatro instrumentos de cómputo.

Un aspecto fundamental de los ordenadores modernos es la separación de memoria y procesador. Ni en Mark I ni en el ENIAC se llegó a materializar esa partición. En ambos computadores las celdas de memoria se hallaban directamente acopladas a circuitos para



4. MULTIPLICACION DE DOS MANTISAS en el procesador de Z3. Para simplificar el diagrama utilizamos registros con cuatro bits (en vez de 15). Al principio (*a*) el multiplicando 1,001 (= 1,125 en decimal) se encuentra en el registro *Bb* (que representa la mantisa del registro R2) y el multiplicador 1,101 (= 1,625 en decimal) en el registro *Bf* (mantisa del registro R1). El registro interno *Ba* para los resultados intermedios está inicializado a 0. En cada ciclo (*b* hasta *e*) se suma el multiplicando con el resultado parcial, siempre y cuando el bit correspondiente del multiplicador (*flecha roja*) sea 1. El nuevo resultado parcial se desplaza una posición hacia la derecha y se almacena en *Ba*. La última posición binaria se pierde en esta operación (error de redondeo). Cada uno de los diagramas (*b*) a (*e*) muestra el estado del procesador antes de que se ejecute la adición. En el último ciclo (*f*) se escribe el resultado final 1,110 (= 1,75 decimal), ahora sin desplazamiento, en *Bf*. El resultado, aunque parece falso, es igual al resultado decimal correcto 1,828125 cuando se redondea su representación binaria utilizando cuatro bits para la mantisa.

cálculos numéricos. Por esa razón, y en proporción a su limitada capacidad de cálculo, resultaban unas máquinas en exceso complejas. La verdad es que sólo Z3 y ABC eran computadores exclusivamente binarios. En Mark I y ENIAC se utilizaban internamente números decimales, aun cuando los componentes lógicos eran binarios. Pero ninguna de las cuatro máquinas proporcionaba al programador instrucciones para modificar el flujo del programa de acuerdo con el valor de una variable determinada (bifurcación condicional). En computadoras universales estas instrucciones de transferencia son imprescindibles; si así no fuera, se haría imposible modificar el curso del cálculo en coherencia con los resultados parciales. El ENIAC podía realizar cierto tipo de bucles (secuencias repetitivas) y transferir el control al final de su ejecución; para eso disponía de sólo una unidad de control. Zuse introdujo instrucciones de transferencia en otros de sus diseños de años posteriores.

Importa señalar que, de los cuatro computadores, únicamente Z3 utilizaba números de coma flotante. Z3 y Mark I eran dispositivos electromecánicos; ABC y ENIAC se basaban ya en tubos de vacío. ABC se proyectó para operar con vectores y, como tal, se le considera un precursor de los procesadores vectoriales al uso. La arquitectura del ENIAC encarna lo que llamaríamos "arquitectura de flujo de datos". No se escribía un programa, sino que se modificaban las conexiones de una unidad a otra: los datos fluían a través de la máquina y se transformaban en cada unidad (con adición, substracción, etc.). ABC y ENIAC carecían, por tanto, de programación lógica ("software"). El computador ABC sólo podía ejecutar el programa materializado en sus circuitos: el algoritmo de Gauss para la solución de sistemas de ecuaciones lineales. Z3 y Mark I, por contra, leían sus programas de cinta perforada.

Zuse y Atanasoff construyeron sus respectivos ordenadores en solitario. Lo que no ocurrió con Mark I ni con ENIAC, en cuya concepción y realización colaboraron grupos importantes. Zuse y Atanasoff tuvieron, pues, que refinar al máximo sus proyectos para no gastar ni un tornillo de más. El diseño arquitectónico entrañado en Z3 posee, sin embargo, una mayor madurez y señala el camino que se seguirá en el futuro, lo que no se percibe en ABC, un modelo de máquina más limitado.

Sabido es que la victoria tiene muchos padres y la derrota es huérfana. Aplicado ese aforismo a la historia del ordenador, no podemos hablar de un instante decisivo ni de un inventor clave. Lo que se dio fue un largo proceso de desarrollo que culminó en las máquinas de cómputo universal que usamos hoy en día. Muchas ideas, grandes y pequeñas, hubieron de entremezclarse con los conceptos básicos de Turing. Ni deben olvidarse los precursores, con Charles Babbage (1791-1871) al frente, quien concibió un autómata programable al que llamó Máquina Analítica. John von Neumann (1903-1957) influyó de manera importante en el diseño de los ordenadores construidos después de la guerra. Aunque de sus manos no saliera ningún ordenador, se mantuvo siempre en la primera línea, aportando ideas sobre teoría de computabilidad y ayuda a otros.

Hace algunos años dicté una conferencia sobre algunos de los temas abordados en este artículo. En la última diapositiva había tres nombres: Babbage, Zuse y von Neumann, por ese orden. Cuando en 1993 le enseñé la filmina a Zuse, confiado en que se alegraría de ver su nombre en tan ilustre compañía, me espetó: "¿Qué hace ahí von Neumann?

Así de seguro en su valía era el ilustre inventor. Nadie puede objetar, empero, que su puesto en la historia de la técnica se lo ganó a pulso. A él le debemos que en 1936 terminara la memoria mecánica de 1936, el autómata que anunciaba desde un pequeño apartamento de Berlín el inicio de una nueva era, la era de la computación.

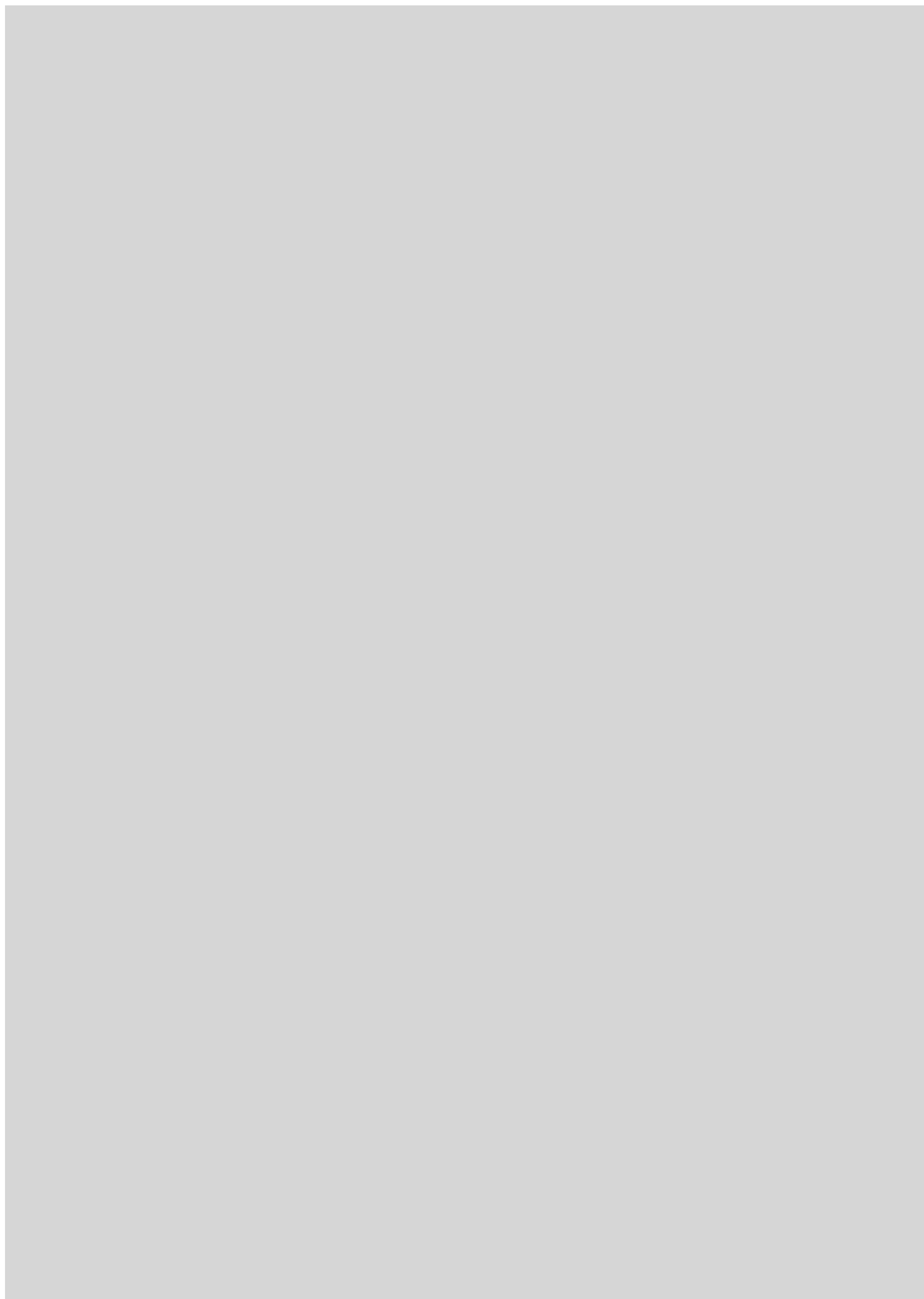
BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

DER COMPUTER–MEIN LEBENSWERK. K. Zuse. Springer-Verlag, Berlín, 1984.

"WHO INVENTED THE COMPUTER? THE DEBATE FROM THE VIEWPOINT OF COMPUTER ARCHITECTURE". R. Rojas en *Fifty Years Mathematics of Computation, Proceedings of Symposia in Applied Mathematics*, AMS, coordinado por W. Gautschi, páginas 361-366, 1993.

DIE RECHENMASCHINEN VON KONRAD ZUSE. Dirigido por R. Rojas. Springer-Verlag, Berlín, 1996.

KONRAD ZUSE'S LEGACY: THE ARCHITECTURE OF THE Z1 AND Z3. R. Rojas, en *IEEE Annals of the History of Computing*, vol. 19, n.º 2, páginas 5-16, 1997.



Marguerite Holloway

JANE GOODALL: La avenida del pasado

De pie, en el porche de una casa de madera de Washington, bajo una gruesa rama de arce y al lado de unas enredaderas que le dan al jardín cierto aire de vegetación salvaje, repite de nuevo el grito: un sonido bronco, contenido, inhumano, que ataja en seco el murmullo de los corrillos. Han venido, incluso de puntos muy distantes, para escuchar la disertación de Jane Goodall. Así convoca a los asistentes, con la sobrecogedora llamada ululante del chimpancé. Salpica sus lecciones con ese y otros reclamos, que transportan al público hasta las selvas de Tanzania, eliminándose toda distinción entre la científica y los sujetos que estudia.

Mientras profiere ese extraño alarido —utilizado para establecer contacto con los miembros más apartados de la pandilla—, Goodall se queda quieta, inmóvil. Los treinta años que ha pasado acechando en silencio el comportamiento de los chimpancés del Centro de Investigación del Arroyo Gombe han dejado su impronta. Se mueve sin que parezca que se mueva; ríe y gesticula sin perder una quietud y calma infinitas. De ello ha necesitado en abundancia para tratar también a los humanos. El método de trabajo de Goodall, hoy celebridad respetada, rompió moldes en un comienzo. No le viene, pues, de nuevas la controversia que provoca su defensa de los derechos del animal, ahora que ha dejado la selva.

Conflicto ajeno al ambiente que reina en la suave pendiente de este jardín soleado. Los asistentes, con ejemplares de *In the shadow of Man, Through a Window* y otras obras suyas, siguen embelesados las experiencias que cuenta con los chimpancés en libertad. Los protagonistas de la historia (Flo, Flint, Fifi, Pom, Passion) les resultan a algunos tan familiares como los parientes o los viejos conocidos. Goodall habla de la importancia de los estilos de maternidad a la hora de conformar el desarrollo de los chimpancés, de una madre y su hija que en cuatro años masacraron a todos los recién nacidos excepto uno. Tiene un recuerdo para Louis Leakey, a quien se le debe la idea de que los chimpancés, a los que nos acerca un 98 por ciento de homología genética, constituyen una ventana que da a la avenida del pasado.

Leakey (¿quién iba a ser, si no?) sugirió a Goodall que se apostara ante el alféizar. Lo que siguió es historia famosa. Goodall, nacida en Londres en 1934 y obsesionada desde niña con los animales y con los relatos del Dr. Doolittle, trabajó de camarera y de secretaria para ganar dinero e irse a Africa. Una vez en Kenia, Goodall se presentó ante Leakey para decirle que quería trabajar con animales. Tras un somero examen de sus conocimientos sobre la vida salvaje durante un paseo por una reserva turística, la tomó como secretaria adjunta y luego, en 1960, la envió al campo a observar chimpancés sin mayor preparación.

Leakey buscaba mujeres jóvenes para estudiar los distintos grupos de primates. Pensaba que serían observadoras más pacientes y menos amenazantes para los simios machos que los hombres. Tras Goodall siguieron Dian Fossey, que se aplicó a los gorilas, y Birute Galdikas, que se ocupó de los orangutanes. La idea del legendario paleontólogo prendió. Pocas disciplinas hay como la primatología en que las mujeres igualen en número a los varones. “Jane Goodall tuvo un papel determinante al establecer un modelo de conducta. Hace treinta años —explica Meredith Small, antropóloga de la Universidad de Cornell— demostró que una mujer podía vivir en la jungla y observar a los animales. Cada año, varias jóvenes llaman a la puerta de mi despacho para decirme que quieren imitar a Goodall y estudiar el comportamiento animal. Abrió una senda para las que sueñan con el trabajo de campo.”

Al principio, Goodall contó con la compañía de Vanne, su madre, pues las remotas selvas a orillas del lago Tanganika eran consideradas inseguras para una mujer joven y solitaria. Los chimpancés la rehuían en un comienzo. Pero la paciencia de meses dio sus frutos cuando observó dos actividades nunca registradas: la ingesta de carne y el uso de largos tallos de hierba a guisa de herramienta para sacar las termitas de su hormiguero. Siguiendo con constancia a los simios, Goodall descubrió la red de interrelaciones y reconstruyó la estructura social del grupo que observaba. Describió los lazos que existen entre madre e hijo —unos fuertes y otros no tanto—, la lealtad y la rivalidad en la prole, las exhibiciones de los machos, sus ataques, su dominancia y la actividad sexual, todo ello asignado a individuos determinados, diríase que casi dotados de personalidad. Flo era una madre estupenda y una hembra de atractivo sexual; su hijo, Flint, estaba demasiado apegado a ella y murió de pena poco después de la muerte de su progenitora; Passion actuaba a sangre fría, matando y comiéndose las camadas de otras hembras.

No era el estilo acostumbrado en la exposición científica. “Una de las cosas que se introdujeron en primatología, y en biología de la evolución, a medida que asimiló la influencia de Jane en la disciplina, fue que la gente empezó a hablar de individuos. Ella ya lo estaba haciendo por una cuestión de temperamento”, señala Sarah Blaffer Hrdy, antropóloga de la Universidad de California en Davis. “Ella no daba su brazo a torcer en su esfuerzo por antropomorfizar y dejar que sus emociones impregnaran lo que veía que hacían los animales.”

“En 1960 no se estilaba dar nombres a los animales”, recuerda con amargura Goodall, acariciando con los dedos el talismán de hueso maorí que lleva al cuello. “Carecían de personalidad, exclusiva de la especie humana. No podría haber estudiado la mente del chimpancé, pues sólo los humanos tenían mente.” Va más lejos y explica, con una voz a la vez suave, dura, fuerte, calmada y apasionada, que su primer artículo para *Nature* se lo devolvieron corregido: habían quitado todas las referencias de persona. “Si les dejo, hasta quitan las distinciones

de género. Pero eso es lo que había; los animales eran algo impersonal. Es mucho más fácil torturar a algo impersonal. A veces me pregunto si los nazis, durante el holocausto, no se referirían también a sus víctimas como si fueran cosas."

El carecer de un bagaje científico le permitió, dice, considerar los animales desde una perspectiva más humana. En vez de tomarlos por extraños, pensaba en las etapas de la vida y en las emociones (infancia, adolescencia, congoja, rabia, juegos) y a causa de ello contemplaba bajo una nueva luz el comportamiento animal. Pero su falta de formación superior podría haberle supuesto un lastre a la hora de difundir sus resultados, de modo que Leakey dispuso que estudiara etología en la Universidad de Cambridge. Goodall recibió su doctorado en 1965, el mismo año que una revista de prestigio daba a conocer al mundo a "la señorita Goodall y los chimpancés salvajes".



El alarido de llamada reúne a familiares y amigos

Una vez asegurada la fama y la reputación científica, Goodall continuó su trabajo en Gombe, preparando a toda una oleada de estudiantes. Sin embargo, las interacciones entre los investigadores y los sujetos estudiados crecían al mismo ritmo que el tamaño del campamento. La crítica que se ha hecho a algunas de las observaciones de campo es que son difíciles de interpretar, como el caso de las peleas por la comida. "Al cambiar el entorno y darles plátanos, ha falseado los resultados", mantiene Robert Sussman, de la Universidad de Washington. "No se puede escamotear el efecto de los humanos."

Goodall lamenta el reparto de plátanos (sobre todo por el escepticismo de Leakey frente a todas sus observaciones posteriores), pero en absoluto se arrepiente de haber intervenido durante una epidemia de poliomielitis entre los chimpancés, ni de haber amenazado a Passion y su hija con un palo para que Little Bee y su bebé recién nacido pudieran escapar. "Yo no era una científica. Ni quería serlo. Lo que quería era aprender de los chimpancés", subraya. "Y se levantó ese tremendo anatema: '¡Pero si estás interfiriendo con la naturaleza!' Pues bueno, pero es que luego estaban todos esos científicos que salían y cazaban una buena porción de la población que estudiaban para examinar los contenidos del estómago. ¿Es que eso no es interferir con la naturaleza? ¡Es tan ilógico!"

Parte de su trabajo actual, explica, es hablarles a los estudiantes sobre la ciencia y eliminar el prejuicio de que debe ser fría y distante. "Muchas veces me piden que hable sobre la ciencia más ligera, digamos, para que los niños no piensen que todo consiste en despedazar las cosas en trocitos y ser totalmente frío y objetivo."

Goodall enmarca esta tarea educativa en la cuarta fase de su vida. La primera conllevó la preparación: leer y soñar con Africa. "La segunda fase probablemente sea la más maravillosa que jamás tenga en mi vida. El largo tiempo que transcurrió en el paraíso con los animales más fascinantes que uno pueda imaginar." La tercera fase consistió en transmitir ese trabajo a la comunidad científica. Y la cuarta le sobrevino, según cuenta, a la manera de la visión de san Pablo en el camino de Damasco, durante una conferencia en Chicago. "Todos enseñaban diapositivas de lo que estaba sucediendo en su área respectiva. Pero luego tuvimos una sesión en la que la gente mostró películas sacadas a escondidas en algunos laboratorios, donde los chimpancés se emplean para la investigación médica, y aquello fue para mí como una visita a Auschwitz. Ni más ni menos. Me dije: ha llegado el momento de devolver la deuda."

Devolver la deuda significa denunciar el sacrificio innecesario de los animales en la investigación médica y establecer refugios para los chimpancés capturados ilegalmente. Goodall ha sido atacada por su defensa a ultranza, aunque acepta ciertos usos, pues no en vano su madre le debe la vida a la válvula cardíaca de un cerdo. También han criticado a Goodall por salvar los simios capturados en vez de destinar el dinero al mantenimiento de las contadas reservas donde viven los chimpancés salvajes que quedan, unos 250.000. Lo más importante son los individuos, dice. ¿Cómo olvidarse de todos los chimpancés hacinados y hambrientos que se ha encontrado en los mercados de Africa?

Aunque dedica muchas horas a la búsqueda de fondos para su causa, no deja de reflexionar sobre el comportamiento de los chimpancés. Está interesada especialmente en la transferencia de las hembras: por qué algunas abandonan el grupo y permanecen alejadas; por qué otras se van, quedan preñadas y vuelven. En Gombe la investigación continúa. En agosto de este año, *Science* publicaba un artículo de Goodall, Anne Pusey y Jennifer Williams, de la Universidad de Minnesota, sobre el papel de la jerarquía en el éxito reproductivo de las hembras. Aunque la jerarquía de las hembras resulta difícil de establecer (no es tan patente como la dominancia del macho) las autoras han estudiado las llamadas de sometimiento registradas entre 1970 y 1992 para determinar la posición social. Llegan a la conclusión de que la progenie de las hembras mejor situadas en el escalafón tienen tasas de supervivencia más elevadas y sus hijas alcanzan antes la madurez sexual.

Agricultura

En la cuenca mediterránea

La región mediterránea está situada en una zona de transición entre el clima templado y húmedo del centro y norte de Europa y la extrema aridez del norte de Africa. Aunque dominan en la cuenca los veranos secos y cálidos, seguidos de inviernos suaves y lluviosos, la variedad topográfica origina climas que van del subhúmedo al árido, causa de la diversidad ecológica de la región.

El mar Mediterráneo tiene un ancho aproximado de 4000 km, desde el Atlántico hacia el este, dentro de unas latitudes dominadas por un tiempo anticiclónico en verano y por sucesivas borrascas en invierno, que se desplazan generalmente desde el oeste hacia el este. De norte a sur y de oeste a este el clima se hace más soleado, las temperaturas más altas y la pluviometría más reducida.

El déficit de humedad constituye la principal limitación de la producción agrícola mediterránea. Obedece a diversos factores: insuficiencia de lluvia, baja efectividad de la precipitación y alta variabilidad interanual de los niveles de lluvias. La media anual de lluvia varía entre 200 y 900 mm, aunque en algunos puntos se registran 100 mm y en otros 1000 mm. El máximo período de lluvias se concentra entre octubre y diciembre. A causa de la torrencialidad orográfica y reducida capacidad de almacenamiento del suelo, la eficacia del agua caída resulta muy baja. La variación de un año a otro en los niveles de lluvia y su errática distribución geográfica representa uno de los mayores riesgos para las cosechas. Las temperaturas medias mensuales varían entre 24-27º C (julio-agosto) y 7-10º C (enero), aunque pueden ser superiores e inferiores, respectivamente, en las zonas

Superficie de tierras agrícolas en la región mediterránea. (FAO, 1996). Miles de ha.

País	Tierra arable	Cultivos permanentes	Pastos permanentes	Forestal	Regadío
España	15.609	4520	10.687	16.137	3657
Francia[1]	1832	117	1063	1500	1480
Grecia	2421	1081	5250	2620	1327
Italia[1]	3415	1154	1857	2776	2710
Portugal	2200	700	1000	3300	630
Yugoslavia	7527	856	5545	8894	152
EUROPA	33004	8428	25.402	35.227	9956
Argelia	7477	566	31.597	3950	555
Egipto	3110	390		31	3500
Libia	1815	355	13.300	840	470
Marruecos	8625	666	21.000	8970	1258
Túnez	2987	1965	3103	676	385
AFRICA	24014	3942	69.000	14.467	6168
Chipre	101	42	4	123	40
Israel	350	85	145	126	193
Jordania	315	90	791	70	64
Líbano	216	90	10	80	88
Siria	4852	675	8299	487	1082
Turquia	24.705	3066	12.378	20.199	4186
ASIA	30.539	4048	21.627	21.083	5653
TOTAL	87.557	16.418	116.029	70.777	21.777

[1]Zona mediterránea del país.

Nivel de mecanización y población activa en la agricultura en la región mediterránea (FAO, 1996)

País	Hectáreas de tierra arable por cada: Tractor 1974-76	Tractor 1994	Cosechadora Trilladora 1974-76	Cosechadora Trilladora 1994	% total de población activa en la agricultura 1975	% total de población activa en la agricultura 1995
España	41,7	19,8	397,5	318,0	21,5	8,7
Francia	12,7	12,7	111,7	119,0	11,1	4,2
Grecia	31,2	10,7	587,2	387,4	36,6	19,8
Italia	11,4	5,7	335,7	166,0	15,4	6,9
Portugal	66,7	14,7	784,8	550,0	28,1	14,3
Yugoslavia	32,5	13,8	664,8	834,6	41,0	18,9
EUROPA	19,0	13,4	230,2	316,4	20,1	9,0
Argelia	164,4	75,7	1773,2	750,3	39,2	24,1
Egipto	124,1	39,8	1383,0	1312,2	48,8	33,1
Libia	131,3	53,4		532,3	23,5	6,1
Marruecos	354,7	205,4	2684,3	1916,7	51,5	40,7
Túnez	142,3	108,6	1468,2	995,6	38,1	23,5
AFRICA	181,5	85,6	1865,6	1033,0	46,2	31,6
Chipre	37,4	7,3	1216,7	168,3	32,3	10,0
Israel	16,7	13,7	644,1	1346,2	7,9	3,4
Jordania	105,6	41,3	1878,9	4090,9	19,0	14,7
Líbano	78,0	72,0	2600,0	2273,7	17,0	4,2
Siria	343,8	62,1	2817,5	961,4	41,1	32,4
Turquía	103,5	32,4	2164,0	2121,1	64,8	50,7
ASIA	107,8	34,2	2174,8	1722,8	56,6	42,9

del interior. La nubosidad varía entre el 10-20 % y existe un promedio de 250 días soleados al año, que equivalen, aproximadamente, a 3000 horas anuales de sol.

Existen un gran número de vientos asociados a un tipo de tiempo meteorológico, que constituye uno de los rasgos más característicos de la región: mistral (sur de Francia), frío y seco del norte; bora (costa este del Adriático y norte de Italia), que alcanza gran velocidad, y siroco, seco y cálido, procedente del norte de Africa de máxima intensidad en primavera. Las consecuencias del clima mediterráneo desde el punto de vista agrícola son: alta evapotranspiración, balance hídrico negativo en gran parte del año y estrés hídrico en los cultivos. Es necesaria la práctica del riego en los cultivos de verano.

En los suelos mediterráneos predominan las rocas sedimentarias sobre las volcánicas y metamórficas. Abundan los sedimentos calcáreos (rocas calizas, margas y rocas areno-calcáreo-silíceas), con alto contenido en calcio, magnesio y potasio. También son frecuentes altos niveles de sodio, en forma de cloruros y sulfatos, causantes de salinidad cuando no es posible el drenaje natural.

Las pendientes pronunciadas, frecuentes en la región, han dado lugar al desarrollo de suelos de escasa profundidad que limitan la producción agrícola, impidiendo, a veces, la mecanización de los cultivos. La erosión ha dañado severamente los suelos mediterráneos, degradándolos y limitando su productividad.

Las propiedades físico-químicas de los suelos son muy variables. La textura varía ampliamente desde arenosa a arcillosa. Los suelos arcillosos, con elevada capacidad de retención de agua, presentan mayor potencial productivo, al ser el déficit de humedad el principal factor limitante en la región. El clima mediterráneo actúa negativamente sobre la estabilidad de la estructura de los suelos debido a la falta de materia orgánica, aunque el alto nivel de calcio es favorable.

La capacidad de intercambio catiónico es baja; entre los cationes dominan calcio y magnesio. Aunque la arcilla más frecuente es la ilita, hay montmorrillonita en los vertisoles y caolinita en los suelos más viejos. El *p*H del suelo varía de ligeramente alcalino, por la presencia de carbonato cálcico, a neutro y raramente ácido. La larga historia de cultivo en la región ha llevado al agotamiento de las reservas de nutrientes, en especial el nitrógeno, debido a la falta de materia orgánica, y de fósforo, que nunca fue abundante en los suelos mediterráneos. Por contra, los niveles

Sistemas agrícolas de la cuenca mediterránea

En consonancia con las características ambientales, la diversidad de sistemas agrícolas y de cultivo en la región es enorme. Podemos dividirlos en seis grandes grupos:

- Pastoralismo. Se da en muchas zonas de la región, que no pueden soportar cultivos regulares por falta de lluvia. Tienen vegetación de matorral y monte bajo, y estacionalmente de pastos bien adaptados a condiciones marginales de crecimiento.

- Agricultura mixta de secano. Sistema caracterizado por una amplia diversidad de cultivos y alto grado de dispersión de la propiedad. En economía de casi subsistencia se cultivan amplia variedad de árboles (olivos, almendros, higueras, etc.) y viñas, con frecuencia asociados con cereales y leguminosas, y también hortalizas y forrajes anuales para el ganado.

- Cultivos anuales de secano. Predomina el cultivo de cereales, en rotación con leguminosas, plantas industriales y forrajes. Si llueve bastante y hay buena capacidad de retención de humedad de los suelos, la rotación es más intensiva, cultivándose trigo, habas, garbanzo, girasol e incluso algodón. En condiciones ambientales severas la rotación es más simple y el barbecho sigue al cereal, por uno o varios años, para almacenar agua y construir la fertilidad de los suelos. Los cultivos frecuentes son los mejor adaptados a la aridez, como cebada, lentejas, etc.

- Agricultura de riego. El riego representa el factor de mayor importancia para incrementar los rendimientos de los cultivos y reducir los riesgos en las condiciones mediterráneas. Existen dos formas de utilización del agua en los cultivos: riegos eventuales de invierno o primavera, procedentes de ríos y arroyos o acuíferos de crecimiento estacional que se secan en verano, y riegos permanentes durante todo el año. La gama de cultivos es muy amplia, dadas las condiciones térmicas y de luminosidad de la región que propician una larga estación de crecimiento: cereales, leguminosas, forrajes, cultivos industriales, hortalizas, frutales, etc. La rotación de cultivos no es tan rígida ni definida como en el secano.

- Cultivo múltiple. Modalidad de la agricultura de regadío que se practica en las zonas más cálidas de la región. Se introducen varios cultivos en el mismo año. Estos pueden ser hortícolas o bien cereales y cultivos industriales, que se suceden de forma muy diversa hasta obtener dos y tres cosechas anuales. El sistema requiere disponer de equipos mecánicos suficientes y utilizar variedades precoces de corto período de crecimiento y que no presenten limitaciones por el fotoperíodo.

- Cultivos protegidos. Los cultivos bajo plástico se han extendido en las zonas de litoral de la región, de clima invernal muy benigno. Se aprovechan las buenas condiciones luminosas y térmicas del invierno mediterráneo para producir, con estructuras sencillas (acolchados, túneles e invernaderos), hortalizas fuera de época de alta demanda en la exportación y elevados precios. Se cultivan sobre todo solanáceas (tomate, pimiento y berenjena), cucurbitáceas (pepino, melón y sandía), fresas y flores y plantas ornamentales.

de sodio son suficientes y no limitan el rendimiento de los cultivos.

A partir de este marco físico podemos dividir con la FAO la cuenca mediterránea en cuatro grandes áreas, según el modelo de uso de la tierra en función del clima. En primer lugar, una zona árida que comprende el norte de Africa y el Oriente Próximo, con pluviometría anual de 0 a 250 mm. Casi desértica, de pobre vegetación, la agricultura sólo es posible en los oasis y en los valles de los ríos. Se siembra cebada y trigo duro y la actividad dominante es la cría de ganado.

Hay una zona semiárida que se extiende por determinadas áreas del norte de Africa, Oriente Próximo y España central. Se registra una pluviometría anual de entre 250 y 450 mm. Se realizan algunos cultivos permanentes, aunque en condiciones marginales, principalmente cereales de invierno, que alternan con barbecho. En las zonas más pobres y secas el barbecho permanece durante años para pasto del ganado.

La zona subhúmeda de la cuenca comprende áreas del norte de Africa y de Turquía, algunas islas griegas y puntos más meridionales del Mediterráneo europeo. La pluviometría anual está entre 400 y 700 mm. A veces se sustituye la rotación cereal-barbecho por formas más intensivas. Se siembran cereales, leguminosas y cultivos industriales, en algunos casos como cultivos de verano. Su éxito depende de la lluvias de primavera y de la capacidad de retención de humedad de los suelos.

Por último, la zona húmeda abarca áreas de alta montaña y de Turquía y puntos más septentrionales del Mediterráneo europeo. La pluviometría anual supera los 700 mm. Además de los cultivos invernales anteriores se siembran plantas de verano tolerantes a la sequía. También son más frecuentes los cultivos mixtos que en las zonas anteriores.

La larga historia de la agricultura en el Mediterráneo ha dado lugar a que sus efectos sobre el medio sean particularmente evidentes, perturbando los ecosistemas de la región. Ello ha ocurrido de manera más intensa en los últimos 50 años. Los cambios de vegetación producidos por la agricultura han sido significativos. En muchas zonas de la región la ruptura ecológica ha venido inducida por la tala continua de bosques y eliminación de matorrales para quemar y clarear tierras para el cultivo. Amplias zonas forestales se han transformado en tierras baldías, próximas a convertirse en desiertos. Donde la vegetación natural ha per-

manecido, en las áreas más secas y pobres de la región, los efectos del pastoreo intensivo han llevado a la degradación de los pastos y también a una rápida transformación de muchas tierras en desierto.

El progresivo reemplazamiento de las plantas perennes por cultivos anuales ha limitado la permanencia de la cubierta vegetal a sólo varios meses al año, exponiendo el suelo a los efectos erosivos de la lluvia y el viento. A más largo plazo también se aprecian los efectos sobre el clima, al reducirse la humedad ambiental e incrementarse la temperatura cerca del nivel del suelo, que conducen a acentuar la aridez. Los sistemas de cultivo intensivos, que implican la recolección total de la cosecha dan lugar a que el contenido de materia orgánica de los suelos disminuya rápidamente, afectando a su estructura y a la capacidad para resistir la erosión. También el nivel de los principales nutrientes desciende apreciablemente en las tierras con un largo historial de cultivo. El resultado de todo ello, especialmente en las áreas más secas y marginales de la región, es la baja productividad y el fracaso frecuente de los cultivos, que lo acentúa la variabilidad de las lluvias. En estas condiciones los suelos necesitan largos períodos de barbecho para reconstruir su fertilidad.

Con el desarrollo de la mecanización, la mayor profundidad de las labores que invierten el suelo aumentan las pérdidas de materia orgánica por oxidación y del agua por evaporación. La maquinaria pesada contribuye a compactar el suelo, causando serios daños a su estructura y aumentando su sensibilidad a la erosión.

Se está produciendo un proceso de desertización en las zonas áridas mediterráneas, que se extiende a una velocidad alarmante. Lo observamos, por ejemplo, en el sureste español, en una zona de cerca de 20.000 km^2, donde se presenta todo un muestrario de acción erosiva y una red hidrográfica de torrencialidad muy acusada, que afecta a la totalidad del área.

A lo largo de la historia, el crecimiento económico de la región ha ido siempre vinculado a la agricultura. La mejora de los sistemas de cultivo de secano de la zona debe centrarse principalmente en la sustitución del sistema tradicional de barbecho por otros sistemas alternativos que no sea el acostumbrado cultivo del cereal, monocultivo que explota la tierra sin mejorar la estructura y fertilidad del suelo e incrementa el riesgo de infestación de malas hierbas, plagas y enfermedades. Podría optarse por la rotación de cereales y cultivos de leguminosas. Numerosas investigaciones confirman los efectos beneficiosos de este tipo de rotación, similares cuando no mejores, a los obtenidos con el barbecho, con la ventaja de la diversificación de cultivos, el incremento de la producción de proteínas, para alimentación humana y animal, y la integración de cereales y ganado. Para su éxito se requiere una acertada selección de leguminosas adaptadas al suelo y clima; siendo el límite de pluviometría media anual para el cultivo de leguminosas grano alrededor de 350 mm.

Con menos de 300 mm de pluviometría el sistema cereal-barbecho es probablemente la mejor modalidad de cultivo. Entre 300 y 400 mm podría adoptarse el cultivo continuo con cereales y leguminosas, forrajeras o de grano. Por encima de 400 mm se puede introducir mayor diversificación. Los cultivos de verano pueden ser un impedimento para la introducción a gran escala del sistema cereal-leguminosa. Las plantas medicinales, aromáticas y especias tienen un gran potencial; muchas de ellas son nativas de la región y han sido tradicionalmente aprovechadas a partir de la flora silvestre.

La forma más directa y eficiente de mejorar el balance de agua en la agricultura mediterránea es a través del riego, con el que puede mostrar todo su potencial productivo. Sin duda el mayor problema, y más común, está asociado con los altos costes de capital necesarios para establecer los sistemas de riego y su dependencia de condicionantes externos, servicios y precios, que implican costes de producción más altos y mayores riesgos que en muchas áreas de secano. Los sistemas basados en riegos de verano, por la severidad del clima, presentan con frecuencia serias desventajas, dadas las grandes necesidades de agua y el uso menos eficiente por la planta. En áreas con inviernos suaves, el riego debería ser intensivo en primavera y otoño cuando el uso del agua es más eficiente. El objetivo del regadío en la región, dada la limitación de agua disponible, debería ser mejorar la eficiencia por m^3 de agua utilizada. En las zonas que son deficientes en producción de alimentos, se ha sugerido el uso del riego suplementario para incrementar y estabilizar las producciones y suministrar las condiciones adecuadas: cultivares de alto rendimiento, más fertilización, cultivo más intensivo y mejora de las técnicas agrícolas.

Muchas políticas de desarrollo agrícola de la región están concentradas en torno a programas de mejora del riego, dedicándose a ello importantes recursos. En muchas áreas de regadío, la explotación a gran escala de las reservas de aguas subterráneas y superficiales está siendo peligrosa y perturbadora. Se han realizado pocos estudios para establecer con fiabilidad las reservas de agua subterráneas. A pesar de los esfuerzos empeñados en los últimos años para desarrollar y regular las reservas de aguas superficiales, todavía gran cantidad de agua de tierra firme se pierde en el mar. Estas pérdidas deberían evitarse mediante la construcción de nuevos embalses, que regulen mejor los cauces de los grandes ríos de la región.

LUIS LÓPEZ-BELLIDO
Escuela Técnica Superior
de Ingenieros Agrónomos y Montes
Universidad de Córdoba

Estructura de la materia

¿Qué son los oscilones?

El comportamiento del material granulado ha venido cautivando a los científicos de distintas áreas desde hace décadas. Adquiere suma importancia económica en sectores tan dispares como la minería o la farmacia. Por ejemplo, en la minería del cobre más del 80 % del gasto de la energía se utiliza en producir, transportar, clasificar por tamaño y seleccionar por composición este material. Pese al enorme interés que reviste la optimización de dichos procesos, queda mucho por conocer sobre la fenomenología de los materiales granulares. De ahí que algunos físicos hayan iniciado una serie de experimentos en un intento por descubrir los mecanismos fundamentales que rigen su dinámica.

Con infundada ingenuidad se cree que los granos que componen la arena son el análogo de los átomos que forman la materia en general. Conviene saber, sin embargo, que las colisiones entre los átomos o moléculas en un sólido, líquido o gas, siempre conservan la energía. Las colisiones entre granos, al contrario, son siempre disipativas, porque una parte de la energía de movimiento de éstos se transforma

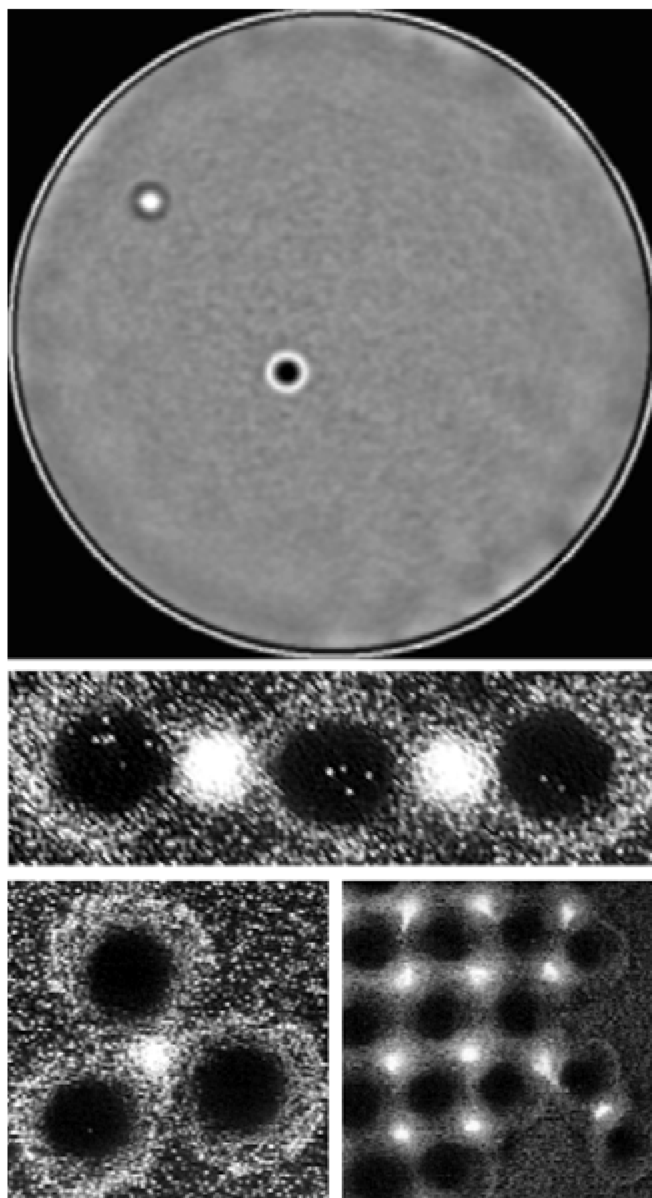
en calor, ya sea por inelasticidad o por fricción.

El comportamiento de un material granulado depende, pues, de la tasa de inyección de energía de movimiento y de la tasa de disipación de la misma. Así, cuando la inyección de energía en un conjunto de granos es nula, éste se comporta como un sólido y puede soportar esfuerzos de compresión. Pero si la inyección de energía es considerable y su disipación pequeña, el material podría comportarse como un líquido que fluye o incluso como un gas. El que lo haga de una forma u otra dependerá de si la separación relativa entre las partículas es del orden de una fracción del diámetro de un grano o mucho mayor que éste.

Podemos observar el comportamiento trivalente del material granular cuando se le somete a vibración vertical; en esa situación, se produce una inyección de energía durante cada colisión entre el plato oscilante y la capa granular. Nuestros estudios en este sistema han mostrado una serie de bifurcaciones que dan origen a ondas de superficie estacionarias; tales ondas forman cuadrados, líneas y hexágonos que oscilan a la mitad de la frecuencia de excitación. Se trata de un comportamiento propio de un líquido. Ondas de este tipo las había observado Faraday en la superficie libre de un fluido ya en 1831. Pese a dicha similaridad, existen grandes dificultades en la formulación de una teoría cuantitativa para un fluido compuesto de granos en interacción.

Estudios posteriores nos han mostrado la existencia de ondas locales, que hemos llamado "oscilones", dotadas de la propiedad de interactuar y combinarse para dar origen a estructuras más complicadas o "cuasi-moléculas". Un oscilón es una excitación circular de la capa de arena, que oscila también a la mitad de la frecuencia de la caja. Durante un ciclo del contenedor, es una montaña, mientras que en el ciclo siguiente un cráter (*véase la figura*). Debido a esta propiedad, cráteres y montañas pueden coexistir en la caja; cuando se examina la capa en ciclos alternos, los cráteres continúan siendo cráteres; lo mismo ocurre con las montañas.

Oscilones de igual fase muestran una interacción repulsiva de corto alcance, mientras que oscilones de fase opuesta se atraen y superponen formando una estructura dipolar estable. A pesar de que la región de superposición entre dos oscilones es cercana al radio de un cráter, al encontrarse éstos conservan su forma y fase relativa. Además de dipolos, pueden crearse otras combinaciones de cráteres y montañas; por ejemplo, cadenas para las cuales los oscilones constituyentes tienen número de vecinos cercanos igual a dos, o moléculas triangulares en las cuales el oscilón central tiene tres vecinos.



Estructuras diversas: dos oscilones de fase opuesta, moléculas lineal y triangular formadas por superposición de oscilones y red cuadrada de oscilones

Por sorprendente que parezca, no se han encontrado moléculas cuadradas aisladas. Sin embargo, la estructura cuadrada muestra que, cuando el nivel de vibración decrece, se separan de la red pequeñas cadenas de oscilones individuales para desaparecer. Un proceso de este tipo nos indica que la red cuadrada está compuesta por una superposición de oscilones, en una disposición similar ("array") a la de un cristal iónico. Se sabe también que las estructuras hexagonales pueden considerarse un cristal formado por oscilones, pero en este caso todos ellos necesariamente de igual fase. Para suprimir la coexistencia natural de oscilones de distinta fase, basta con cambiar ligeramente la periodicidad del movimiento de la caja.

Cabe, pues, admitir la vinculación de los oscilones con el carácter dual sólido-fluido del material particulado. Los oscilones sólo aparecen cuando la dilatación de la capa granular, debido a la energía inyectada, es muy cercana a la necesaria para producir un movimiento relativo entre granos vecinos, es decir, en los lindes de una transición de fase del tipo sólido-líquido. De esta forma, el estudio de los movimientos colectivos en arena nos ofrece una herramienta para identificar la variedad de estados en que la materia granular puede encontrarse, comprender el tránsito de un estado a otro y adentrarse en la coexistencia de estados diferentes de la materia granular bajo idénticas condiciones experimentales.

FRANCISCO MELO
Universidad de Santiago, Santiago de Chile
PAUL B. UMBANHOWAR Y HARRY L. SWINNEY
Centro de Dinámica No-lineal y Departamento de Física
Universidad de Texas en Austin

Las tarjas

Un sistema primitivo de contabilidad

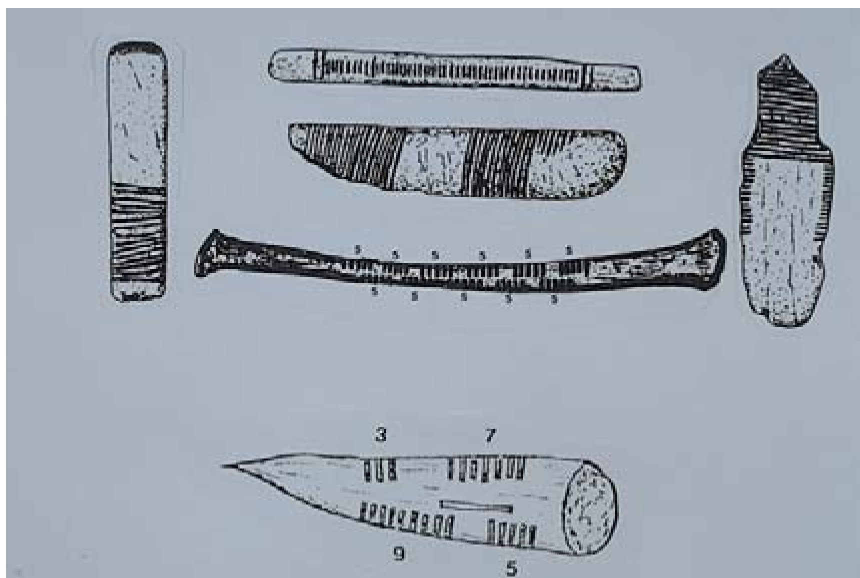
El método de contabilidad más antiguo, atestiguado con un sólido registro arqueológico, es el de las muescas en trozos de hueso o madera. Otro es el método de los nudos de los cordeles. Abundan en los museos de Europa occidental multitud de objetos procedentes del paleolítico en los que aparecen tales muescas, como el radio de lobo de época auriñacense hallado en Dolni Vestonice en 1937, con 55 muescas incisas y repartidas en dos series de grupos de cinco, y el punzón de asta de reno de época magdaleniense encontrado en Brassempouy, que muestra una muesca longitudinal intercalada entre dos series de muescas transversales, espaciadas a intervalos regulares y repartidas cada una en dos grupos definidos.

Demos un salto histórico. En la Edad Media francesa existía un impuesto, la "taille", cuyo nombre procede de la costumbre de los recaudadores de marcar sobre una talla de madera lo aportado por cada contribuyente. Hasta 1826 la hacienda inglesa disponía de unos barrotes de madera de olmo, los "tallies", para certificar el pago de los impuestos y contabilizar las entradas y salidas de dinero.

Pero no era una práctica exclusivamente europea. En Extremo Oriente, el uso de tablas con marcas de contabilidad aparece referido en una crónica del explorador J. Harmand a su paso por Laos en 1879. En América del Norte y durante los siglos XVIII y XIX, indios y colonos utilizaron las muescas con ese mismo fin.

Ese viejo método se resiste a morir, incluso en Occidente. Todavía a mediados de siglo, refiere Georges Ifrah, se mantenía en un pueblecito de los aledaños de Dijon. Pero no es la última referencia. Hasta 1995, la aldea de San Muñoz, en la zona sur del Campo Charro, a 45 km de Salamanca, ha venido adquiriendo pan a crédito mediante el procedimiento de las "tarjas". Son éstas unos prismas cuadrangulares de 1 cm^2 de sección y con longitud variable entre 11,5 y 14,5 cm, trabajados en la madera blanda y sin nudos procedente del mimbrero común (*Salis viminalis*) u otros sauces mimbreros (llamados "saoz"), aptos para que sobre sus aristas longitudinales se efectúen muescas a medida que el comerciante va entregando productos a cuenta o al fiado (panes a cuenta de sacos de harina o hasta su pago en metálico).

Una tarja charra puede contener hasta 70 muescas. De los cuatro paralelogramos o caras mayores de la tarja, dos llevan grabados a fuego las iniciales del comerciante (o su marca de propiedad) y otra cara, una marca del cliente, o su nombre, a pluma o bolígrafo. La utilidad crediticia de las tarjas tiene un antecedente en la palabra anglosajona "tallyman", vendedor a crédito. La aplicación concreta en la venta del pan se corresponde con la referencia borgoñona, aunque según una modalidad diferente.



1. Dibujos de objetos con muescas del paleolítico. Arriba, huesos de 35.000 a 20.000 años de antigüedad; entre ellos, el radio de Dolni Vestonice, que constituye una notación gráfica sobre base 5 de los primeros números naturales. Abajo, punzón de Brassempouy, en el museo de Aquitania, de 19.000 a 12.000 años de antigüedad, susceptible de haber servido como factura de entrega, representación de los cinco primeros números impares o instrumento aritmético (la especial disposición, en el punzón, de los números correspondientes a las muescas permite encontrar rápidamente algunas operaciones matemáticas como 9 – 7 = 5 – 3; 7 – 3 = 9 – 5; 3 + 9 = 5 + 7)



2. Tarjas procedentes de San Muñoz, en Salamanca. Su utilización hasta fechas inmediatas en la venta de pan a crédito constituye una supervivencia del método más primitivo y universal de contabilidad

En el caso de Dijon, el panadero cogía un pedazo de madera de una longitud aproximada de 20 cm y lo partía longitudinalmente en dos. A continuación, yuxtaponía las dos tablillas de madera y, en el corte entre ambas, hacía con una sierra o un cuchillo tantas muescas, trazos o cruces como hogazas de pan entregaba al parroquiano. Daba la mitad de la talla a este último y se quedaba con la otra en la panadería, guardándola ensartada junto a los palos de otros clientes. La cuenta y el pago se llevaban a cabo en una fecha fija (una vez al mes o cada quince días, por ejemplo), por lo que el control era sencillo. Además, en estas condiciones no podía haber reclamación alguna: ambas mitades tenían las mismas muescas, con la misma forma, idéntico tamaño y el mismo sitio. Obviamente, el cliente, no podía eliminar ninguna muesca, ni el panadero añadirla. Si este último se hubiese atrevido a hacerlo, con sólo comparar ambas porciones se hubiese descubierto el fraude.

En el caso salmantino, la tarja era propiedad del panadero, no se escindía y su único depositario era el cliente. A la entrega de un pan, el panadero tomaba la tarja que le presentaba su cliente, practicaba una muesca a la vista de todos y devolvía la tarja a su parroquiano, esperando que la capacidad de muescas de la tarja se agotase. En ese momento, reclamaba al cliente el débito total. El panadero sabía que su parroquiano no podía eliminar las muescas realizadas ni iba a cometer la necedad de añadir otras por su cuenta, por lo que no mantenía reticencia alguna a que el cliente actuase como depositario. Ante la eventualidad de la pérdida de la tarja por el cliente, el panadero entregaba a éste una nueva tarja hasta la aparición de la anterior, pero si no aparecía, podía hacer uso de su derecho a reclamar el número de panes correspondientes al número máximo de muescas practicables en el tipo de tarja al uso. (Ultimamente, el panadero llevaba una contabilidad paralela en un libro de cuentas.)

FRANCISCO J. MARTÍN GIL,
MARÍA FRANCISCA GARCÍA GARCÍA,
JESÚS MARTÍN GIL
Y Mª. EUGENIA BARRIO ARREDONDO
Laboratorio de Investigaciones
sobre Medio Ambiente
y Conservación del Patrimonio
H.-A. de Castilla y León,
Universidad de Valladolid

Trasplante cardíaco

Diagnóstico no invasivo del rechazo

El trasplante de corazón constituye el tratamiento de elección para cardiopatías muy severas en pacientes con mala situación clínica cuando ya no existen otros remedios alternativos. De los pacientes que están en esta situación, el trasplante es capaz de salvar a 8-9 de cada 10.

Son tres las causas más frecuentes de fallecimiento tras el trasplante: fallo agudo del injerto (fracaso del corazón donante en el momento del implante), infecciones y rechazo. El diagnóstico del rechazo miocárdico se realiza tomando una muestra de la superficie interna del corazón mediante unas pinzas especiales (biopsia endomiocárdica), que se analiza al microscopio. El gran inconveniente de la biopsia reside en su carácter agresivo; las complicaciones debidas a ella, aunque poco frecuentes, pueden llegar a ser importantes (infecciones, trombosis venosa, hemorragias, arritmias, bloqueos, roturas valvulares, etcétera). Esa es la razón por la que se han desarrollado muchas técnicas que permiten diagnosticar el rechazo sin necesidad de ser agresivas para el paciente.

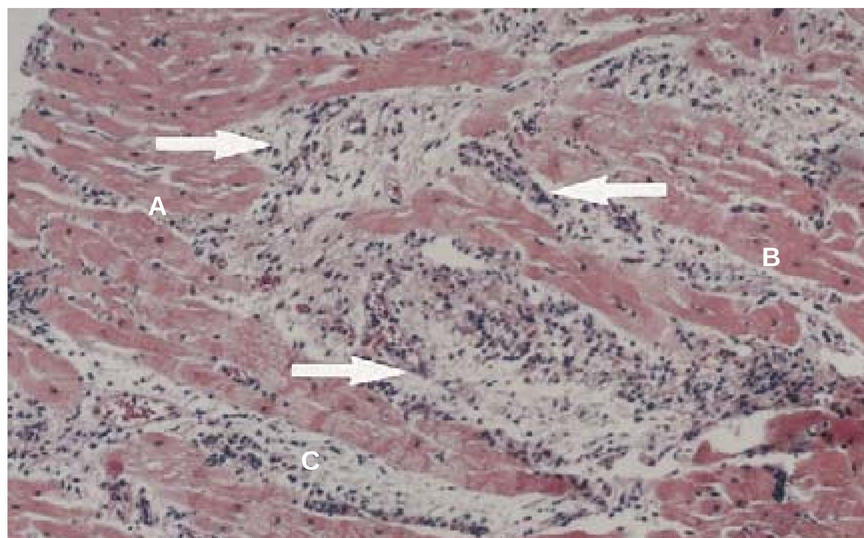
Pero no todas la pruebas no invasivas tienen el mismo valor, ni se basan en el mismo fenómeno. Muchas sólo han demostrado ser útiles en estudios limitados de grupos seleccionados y, en ocasiones, sin contrastar suficientemente. Las podemos agrupar, según la técnica empleada para su obtención, en pruebas de valoración clínica, electrocardiográfica, ecocardiográfica, resonancia magnética nuclear, radioisótopos, monitorización citoinmunológica y tomografía de emisión de positrones.

Las manifestaciones clínicas del rechazo agudo son muy diversas. En ocasiones puede producir sensación de malestar, reducción de la capacidad de esfuerzo, reducción de la tensión arterial, irritabilidad, fiebre e inapetencia. El examen físico puede revelar incremento de la presión venosa yugular, auscultación cardíaca patológica con aparición de tercer ruido (así se llama el tono audible al principio de la diástole que suele ser expresión de miocardio enfermo), dolor a la presión en zona hepática (hepatalgia) y retención de líquidos sobre todo en miembros inferiores (edemas).

El electrocardiograma tradicional (ECG) fue muy útil en las primeras etapas del trasplante para el diagnóstico del rechazo. Debido al edema acompañante, se producía una reducción notable del voltaje de la suma de determinadas derivaciones del electrocardiograma (I, II, III, V1 y V6). Sin embargo, desde que se introdujo la ciclosporina como inmunosupresor básico en el trasplante cardíaco, el desarrollo de edema asociado al rechazo se produce más lentamente y es de menor grado, lo que disminuye la sensibilidad del ECG en el diagnóstico. Por ello, se han estudiado otros métodos electrocardiográficos, como la variabilidad de la frecuencia cardíaca o el electrograma intramiocárdico. Se trata de métodos que, en general, se han extendido poco. Existen también determinadas alteraciones del ECG muy sugestivas de rechazo en caso de aparición súbita, como son los bloqueos, depresión del segmento ST, cambios en el eje eléctrico y algunas arritmias (por ejemplo la fibrilación auricular) que insinúan rechazo con una fiabilidad muy alta.

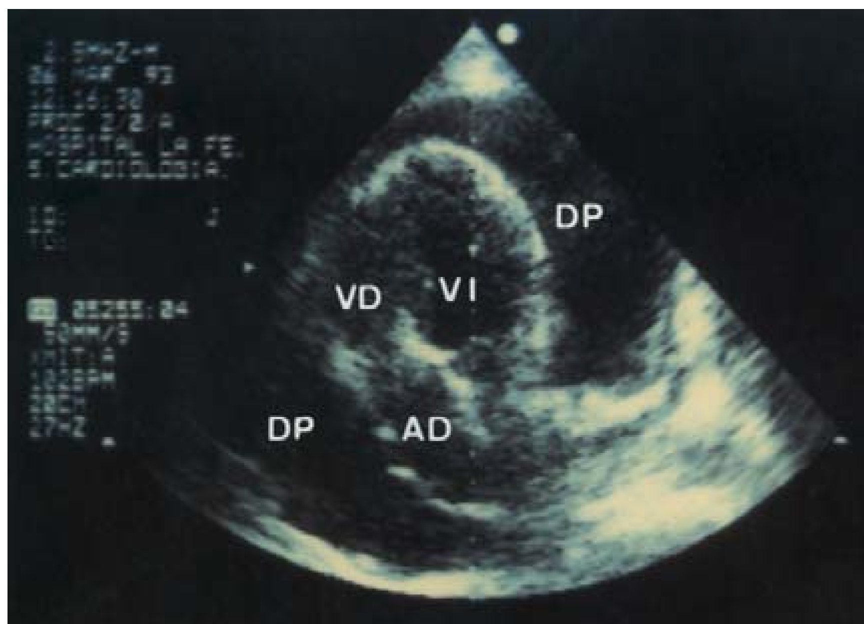
La ecocardiografía constituye una técnica de gran utilidad en la valoración del rechazo y de la función cardíaca en los pacientes trasplantados. Un deterioro súbito de la función contráctil del corazón debe orientar a rechazo importante. No sólo los cambios en la función sistólica son sugestivos de rechazo, sino también los que se originan en la alteración de la función diastólica. La ecocardiografía permite medir el grosor de las paredes ventriculares. Su aumento, ocasionado por el edema que suele acompañar al rechazo, es un signo indirecto de éste. Por otro lado, con este método resulta fácil el diagnóstico de determinadas alteraciones que en caso de aparecer súbitamente nos diagnostican rechazo con mucha fiabilidad, como es el incremento del líquido que existe entre las membranas que envuelven al corazón (derrame pericárdico).

La resonancia magnética nuclear basa el diagnóstico de rechazo en el análisis de la función diastólica y en la caracterización tisular. Técnica prometedora, en ocasiones presenta el inconveniente de diagnosticar rechazo sin serlo, sobre todo en situaciones de abundante grasa epicárdica y pericárdica. Con esta técnica, al igual que con la ecocardiografía, también se obtiene información sobre el tamaño de las cavidades cardíacas, que pueden mostrar incremento de su tamaño con el rechazo.



1. Biopsia endomiocárdica que muestra un rechazo severo. A: Aumento del intersticio con zonas hiperclaras sugestivas de edema intersticial. B: Se aprecia vaso cortado a través con infiltrado vascular linfocitario (puntos negros). *C: Infiltrado inflamatorio muy importante con foco de miocitolisis. (Foto cedida por Melitina Chirivella, del Servicio de Anatomía Patológica de la Fe.)*

En 1969, se informó que el cesio-131 permitía detectar rechazo en el paciente trasplantado cardíaco. Desde entonces, una gran serie de radioisótopos han demostrado similar capacidad, aunque con fundamentos distintos. Así, la captación por el miocardio de talio-201 es sinónimo de buena perfusión e integridad de las membranas de los miocitos; por tanto, un déficit progresivo de captación se relaciona con rechazos importantes. En otro orden, el galio-67 y el pirofosfato de tecnecio-99 se fijan a las células cardíacas en las primeras fases de la necrosis, por lo que su captación por el miocardio es sinónimo de destrucción celular.



2. Imagen ecocardiográfica que muestra la existencia de un derrame pericárdico importante en un paciente con rechazo histológico. Tras el tratamiento antirrechazo desapareció completamente el derrame. AD: aurícula derecha. DP: derrame pericárdico. VD: ventrículo derecho. VI: ventrículo izquierdo

Más recientemente se están empleado anticuerpos monoclonales marcados con indio-111 dirigidos contra la miosina para la detección de la destrucción celular que lleva consigo el rechazo. Cuanto mayor es la captación miocárdica con respecto a la de los pulmones, más probable es la certeza de rechazo.

Las bases celulares del rechazo en el trasplante cardíaco comprenden el reconocimiento como extraño del órgano trasplantado por los macrófagos del receptor. En eso se funda el método de la monitorización citoinmunitaria. Los macrófagos activan los linfocitos *T* coadyuvantes ("helper) y *T* citotóxicos en el proceso de reconocimiento del cuerpo extraño. Los linfocitos *T* coadyuvantes liberan linfoquinas, que activan la maduración de los precursores de linfocitos *T* citotóxicos.

La activación del sistema inmunitario en respuesta al implante produce el rechazo del injerto. Una relación superior a 1 entre niveles de linfocitos *T* coaduyuvantes y niveles de *T* supresores significaría que está produciéndose un rechazo. En su detección podemos guiarnos también por el análisis de las linfoquinas liberadas por los linfocitos, aunque presentan el inconveniente de una vida media muy breve. Sin embargo, existen segundos mensajeros que son estables y pueden detectarse en los linfocitos (receptores) y en sangre periférica; pensemos, por ejemplo, en un incremento en el número de receptores de la interleuquina 2 o de la transferrina en la superficie de los linfocitos en sangre periférica, por no aludir al ingente número de derivados de la cascada inmunitaria, tras la activación linfocitaria, cuyo incremento en su concentración se ha relacionado con rechazo.

Con la técnica de tomografía de emisión de positrones se puede determinar cambios en el flujo sanguíneo miocárdico y alteraciones del metabolismo de los hidratos de carbono. Se recurre a este método para diagnosticar las alteraciones celulares del metabolismo de la glucosa que ocurren con el rechazo.

De entre todos los citados, el método más fiable es el de la biopsia endomiocárdica. Lo que no obsta para que algunos aporten información valiosa y merezcan ahondar en ellos.

LUIS ALMENAR BONET
Servicio de Cardiología.
Hospital Universitario La Fe
Valencia

De cerca

Texto y fotos: Albert Masó

Corteza de áloe

Para hacer frente a las duras condiciones de los desiertos, las plantas han desarrollado diversas estrategias. Podemos fijarnos en una sobresaliente. Nos referimos al tendido de larguísimas raíces horizontales para que, cuando llueva, absorban de una extensa superficie el agua caída. Se comportan de esa guisa gramíneas, leguminosas y compuestas, responsables de los tapices floridos que se forman de vez en cuando en zonas áridas. Se trata de vegetales con poca biomasa, de crecimiento rápido y sin tronco, que emiten directamente las hojas desde la base del suelo. Pero a las pocas semanas se les seca la parte aérea. ¿Cuáles son, pues, las plantas que se ven en los desiertos?

Son las que utilizan otras estrategias. Por ejemplo, la retención perdurable de agua. Cuando se producen precipitaciones, absorben mucha agua a través de un extenso sistema radicular y la acumulan en un tronco muy grande. De eso sabe mucho el famoso baobab y esta liliácea, *Aloe dichotoma*, que, para evitar la pérdida de agua, debe proteger e impermeabilizar el "depósito interior" con una corteza poderosa.

Nuestra planta debe su apellido linneano a la ramificación dicotómica, observable en la primera fotografía. Las ramas terminan en penachos de hojas. Esta especie suculenta alcanza los nueve metros de altura. A diferencia del baobab, que es un solitario empedernido, cuando las condiciones son favorables, puede formar importantes agrupaciones de árboles que, aunque no constituyan auténticos bosques, crean un paisaje de sorprendente belleza.



Técnica fotográfica:

La primera toma se efectuó con un objetivo granangular de una distancia focal de 20 mm (f. 2,8) y las otras dos con uno normal de 85 mm (f. 1,8). El gran ángulo de cobertura del primero permitió ambientar las plantas en su entorno. Para aumentar la calidad de la imagen, se colocó parasol; es más largo el del segundo objetivo por su menor ángulo.

En todos los casos se utilizó un diafragma cerrado: el penúltimo. En el primer objetivo era f. 16 y en el segundo, f. 11. Así se consiguió la suficiente profundidad de campo: en la primera fotografía, para obtener nitidez hasta el horizonte; en la segunda, para cubrir todo el volumen de la cepa y el suelo; y en la tercera, para compensar el relieve y la curvatura del tronco, ya que, al ser un primer plano (mínima distancia de enfoque), la profundidad de campo es también mínima.

La película usada fue de 25º ISO, pues el sol cegador no requería más. Una sensibilidad tan baja proporciona la máxima finura de grano.

Correr sobre las aguas

El secreto de la estrategia del basilisco reside en su remada

James W. Glasheen y Thomas A. McMahon

Los basiliscos, unos lagartos verdes o pardos de América Central, son famosos por su vuelo sobre las aguas. Cuando se ven sorprendidos, estos lagartos Jesús, así se les conoce también, corretean por charcas o lagos sobre sus patas posteriores; los jóvenes parecen volar sobre la superficie, mientras que los mayores se hunden algo en ella. Mediante la filmación en vídeo de siete ejemplares de *Basiliscus basiliscus* capturados en la pluviselva costarricense y la construcción de modelos mecánicos nos hemos acercado al mecanismo físico subyacente bajo tales movimientos.

Todo empieza con un palmetazo del pie. El basilisco golpea el agua para crear un empuje ascensional. Esta fuerza, a su vez, proporciona a un lagarto de tamaño medio, de unos 90 gramos de peso, hasta el 23 por ciento del apoyo que necesita para permanecer en la superficie. Una fracción de segundo más tarde, llega la remada. Cuando el pie golpea la superficie, separa las moléculas del agua y crea un hueco de aire. Además de las fuerzas generadas por el agua que se acelera al apartarse del recorrido del pie, el lagarto obtiene apoyo de las fuerzas creadas por la diferencia de presión entre la cavidad de aire situada sobre el pie y la presión hidrostática por debajo del mismo. En su conjunto, la palmada y la remada subsiguiente pueden producir el 111 por ciento del apoyo necesario para mantener a un adulto corriendo a zancadas por la superficie del agua. Los pequeños, que pesan dos gramos o menos, crean el 225 por ciento del apoyo que necesitan; por eso, sus carreras sobre el agua resultan más libres y menos aparatosas.

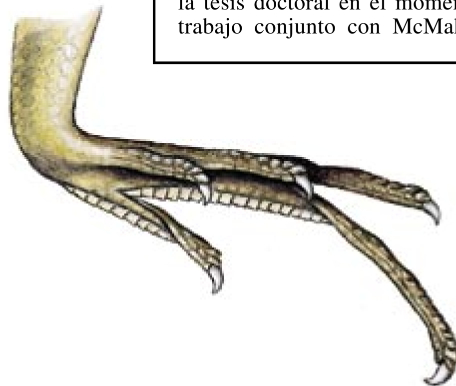
Pero estas ventajas se perderían si el basilisco no sacara su pie pentadáctilo del hueco de aire antes de que el agua se cerrara a su alrededor. Al inclinarlo hacia atrás y extraerlo presto mientras está rodeado sólo de aire, evita el arrastre que se produciría si el pie se extrajera a través del agua. Una minúscula orla que rodea los cinco dedos del pie del basilisco puede facilitar este movimiento. A la manera de un paracaídas, el fleco se abre cuando el pie golpea hacia abajo, creando así una mayor superficie, lo que resulta perfecto para golpear el agua. Después, cuando el pie se retira, el fleco se recoge; los largos dedos se recogen antes de que el hueco se cierre.





Algunas aves palmípedas pueden conseguir carreras semejantes sobre el agua, pero su dinámica es ligeramente distinta. En cuanto a los seres humanos, no tienen nada que hacer. Una persona de 80 kilogramos tendría que correr a 30 metros por segundo (108 kilómetros por hora) y gastar 15 veces más energía muscular de manera sostenida de lo que un ser humano es capaz de gastar. Los basiliscos son los únicos que se pasean por la frontera entre el agua y el aire.

JAMES W. GLASHEEN y THOMAS A. McMAHON investigaron las habilidades acuáticas del basilisco en la Universidad de Harvard, donde McMahon es profesor en la división de ingeniería. Glasheen, asesor de McKinsey y Co., estaba preparando la tesis doctoral en el momento de su trabajo conjunto con McMahon.





UN BASILISCO corre a toda velocidad sobre el agua en la pluviselva costarricense (*arriba*). Por lo general los adultos "vuelan" sobre el agua cuando están asustados; pero los jóvenes lo hacen simplemente para ir de un lugar a otro. Un lagarto de tamaño medio efectúa unos 20 pasos por segundo cuando corre (*secuencia inferior*); en cada uno de estos pasos, el pie crea una bolsa de aire; el animal retira la extremidad antes de que el agua vuelva a cerrarse. Diminutos flecos plegables situados alrededor del pie del basilisco (*derecha*) podrían intervenir en el proceso.

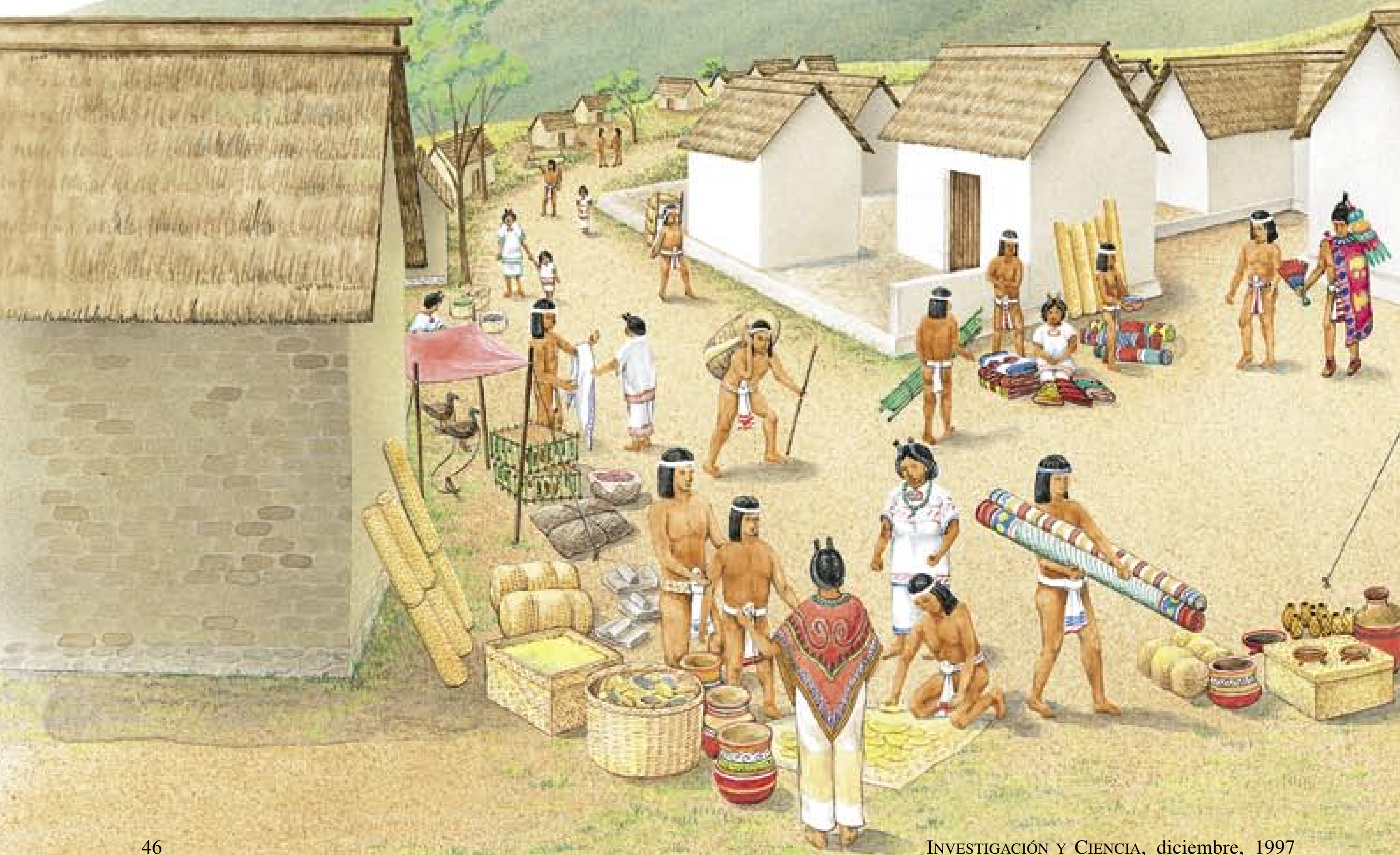
Vida provinciana en el imperio azteca

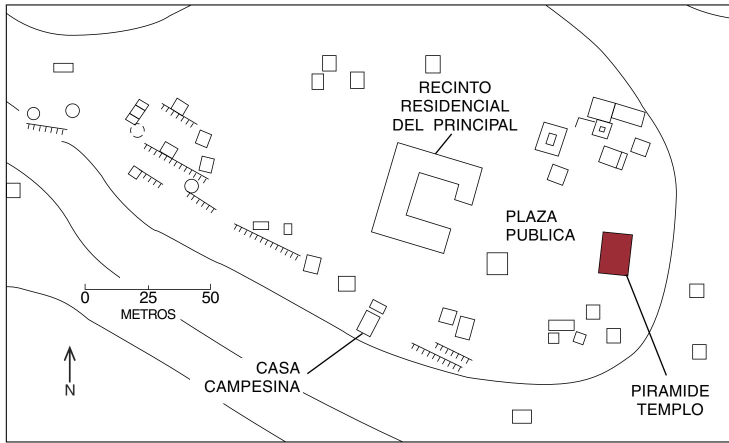
Entre los aztecas el pueblo llano alejado de la capital vivía con mucha más holgura y complejidad de lo que las historias oficiales suelen exponer

Michael E. Smith

Hernán Cortés entró al frente de su tropa en Tenochtitlán en 1519. La ciudad azteca, situada en el valle de México, era la capital de un imperio que imponía onerosos tributos a sus súbditos. El emperador Moctezuma ocupaba la cúspide de una estructura jerarquizada en lo social y en lo político. En el escalón ínfimo, la plebe azteca debía lealtad y tributos a nobles de rango diverso. Por debajo del emperador estaban los reyes de las sojuzgadas ciudades-estado. La dominación azteca seguía una política de gobierno indirecto: las autoridades del imperio daban apoyo a las dinastías locales mientras éstas pagaran a tiempo su tributo trimestral. El pago de estas gabelas se registraba oficialmente en documentos como el códice Mendoza. Los nobles locales, ya habitasen en zona urbana o en el campo, eran súbditos del rey de su ciudad-estado. Con los tributos de la plebe se mantenían, por fin, a todos los niveles de la pirámide.

¿Cómo se las arreglaba el pueblo llano para pagar tales tributos? Ante todo, téngase presente que lo constituía una población numerosa, por lo que el peso de las exacciones estaba muy repartido. Estudiando en los años setenta los tipos de asentamiento, se llegó a la sorprendente conclusión de que en el período azteca se había producido una de las mayores explosiones demográficas de la antigüedad. En el valle de México, centro vital del imperio, se pasó de los 175.000 habitantes durante el período azteca temprano (1150-1350 d.C.) al millón en el período azteca reciente (1350-1519 d.C.). Y en otras partes del





1. PLAZA DEL MERCADO en Cuexcomate, poblado azteca del siglo xv, con puestos de venta, compradores y artesanos. Las gentes del pueblo podían traer aquí los productos artesanales —principalmente tejidos— que elaboraban en sus casas para intercambiarlos por sal y alfarería pintada, provenientes del valle de México y de otras zonas, por hojas de cuchillo de obsidiana importadas de regiones distantes cientos de kilómetros y por agujas y otros objetos de bronce que se fabricaban en el México occidental. También se exponían para la venta artículos de producción local, tales como esteras, cestas, útiles para moler grano, bandejas para cocer tortillas, etc. El mapa de la excavación moderna en el centro del yacimiento de Cuexcomate (*izquierda*) indica dónde estuvieron situados el templo piramidal, el recinto que habitó una familia noble, las casas de los vecinos y algunos otros edificios, así como los más distantes campos de cultivo en terrazas y los habitáculos de los agricultores.

MICHAEL E. SMITH es profesor del departamento de antropología en la Universidad estatal de Nueva York en Albany. Nacido en las Islas Filipinas, inició su formación en la Universidad Brandeis y, en 1983, se doctoró en antropología por la de Illinois. Sus investigaciones versan sobre la arqueología y la etnohistoria del México central postclásico.

a



CIMIENTOS Y PLANTA DE UNA CASA

b



FIGURILLAS RITUALES

c



MOLDES DE FIGURILLAS

territorio se registraron incrementos parecidos.

La explosión demográfica de los aztecas puso en fuerte tensión el entorno del México central. Surgieron por doquier nuevos pueblos y ciudades, y se cultivó toda la tierra disponible, con frecuencia a costa de duros trabajos. Allí donde fue posible los campesinos construyeron embalses y canales para regar los campos; con muretes de piedras escalonaron en forma de terrazas las laderas de las colinas para ampliar el suelo cultivable; y drenando las zonas pantanosas de los alrededores de Tenochtitlán las convirtieron en campos de agricultura intensiva (chinampas), uno de los sistemas de mayor rendimiento agrícola del mundo antiguo. Estas prácticas de cultivo intensivo transformaron el agreste México central en un ordenado paisaje de sembrados.

¿Qué efectos ejercieron sobre la plebe azteca las exacciones tributarias, el aumento de población y la intensificación de la agricultura? ¿Empobrecieron y debilitaron tales procesos al pueblo llano o le permitieron prosperar y llevar una vida

d



FRAGMENTOS DE CERAMICA IMPORTADA

e



UTILES DE BRONCE

f



UTILES DE CERAMICA PARA EL HILADO DEL ALGODON

sana? Hay pocas relaciones escritas que hablen de las condiciones de vida más allá de la capital del imperio; a los arqueólogos toca, pues, resolver esas cuestiones.

Hasta hace muy poco no se había realizado ninguna excavación arqueológica de entidad en asentamientos aztecas. La mayoría de los pueblos y ciudades se destruyeron durante la conquista o, si se ocuparon, quedaron soterrados bajo los nuevos edificios. Sólo permanecieron sin destruir algunos villorrios y humildes aldeas. Por eso, los arqueólogos que trabajaban en Mesoamérica dejaban de lado los asentamientos aztecas en su camino hacia las espectaculares ruinas del período clásico de la cultura maya. Creíase que los yacimientos aztecas eran o muy difíciles de excavar o tan insignificantes, que no valía la pena hacerlo. Ese abandono tuvo brusco fin cuando, en 1978, el gobierno mexicano montó una extensa excavación del Gran Templo de Tenochtitlán. Situado en medio de la actual ciudad de México, la magnificencia de su construcción y la riqueza de las ofrendas a él asociadas despertaron un nuevo interés por la sociedad azteca. Desgraciadamente, las excavaciones no aportaron mucha información nueva sobre la vida del pueblo en las provincias.

Para abordar estas cuestiones, me embarqué con mi esposa, Cynthia Heath-Smith, en proyectos arqueológicos sobre yacimientos rurales y urbanos del moderno estado mexicano de Morelos. Se halla éste al sur del valle de México, y fue la primera zona que conquistaron los aztecas al comienzo de su expansión militar en torno a 1430.

Excavamos primero dos yacimientos rurales —Capilco y Cuexcomate— al suroeste de la moderna Cuernavaca, para trasladarnos a la ciudad azteca de Yautepec, al norte del Morelos central. Desenterrando casas de ricos y pobres, llegamos a la conclusión de que la sociedad provinciana fue más compleja de lo que nos habíamos imaginado. El pueblo llano azteca no eran rudos campesinos sin más



2. LA CASA TIPICA de un campesino era pequeña (de unos 15 a 25 metros cuadrados) y probablemente tendría dos puertas y ninguna ventana. Muchas actividades, como la comunísima de tejer, se realizaban en los patios que había entre las casas. Estas tenían por todo moblaje esterillas y cestos; una simple hornacina con dos o tres figuritas y un pebetero para quemar incienso constituían el adorno de una pared. Es sorprendente la ausencia de fogones; lo más probable es que se cocinara en algún cobertizo detrás de la casa como siguen haciéndolo todavía hoy las poblaciones tradicionales. Las fotografías muestran artefactos desenterrados en vertederos adyacentes a habitaciones aztecas de los siglos XII a XVI, en el moderno estado de Morelos.

horizonte que el apremio de pagar tributos a la opresora clase superior de los nobles. La plebe rural y urbana de provincias dispuso de las ventajas de un próspero sistema mercantil: los productos artesanales elaborados en los hogares se cambiaban por bienes procedentes de otros sitios; la mayoría de estas actividades económicas se realizaban sin ningún control imperial y pasaron inadvertidas a los primeros historiadores sobre los aztecas.

Saben los arqueólogos que las excavaciones de las casas y de los restos a ellas asociados proporcionan los mejores datos sobre la sociedad y economía en un momento determinado del pasado. Capilco y Cuexcomate fueron buenos ejemplos, con restos de muros y trazas de habitáculos visibles a flor de tierra, por lo que no tuvimos que perder tiempo en busca de construcciones enterradas. Capilco había contado con 21 casas; de 150 edificaciones, incluidos templos, almacenes y recintos rituales, había constado Cuexcomate. En ambos asentamientos las casas fueron pequeñas (un promedio de 15 metros cuadrados de planta), y sus muros y paredes de adobes se levantaron sobre cimientos de piedra. Con fines de exploración excavamos zanjas y pozos en 29 casas elegidas al azar. Estas excavaciones nos permitieron acotar mejor la cronología azteca dividiendo su último período en dos subperíodos: azteca reciente A (1350-1440 d.C.) y azteca reciente B (1440-1519 d.C.), para afinar más nuestro análisis.

Capilco lo fundaron unas pocas familias de campesinos en el período azteca temprano. La explosión demográfica comenzó en el reciente A, cuando se construyó Cuexcomate. Ambos asentamientos experimentaron un rápido crecimiento. La población no podía seguir manteniéndose de sólo los cultivos de secano, por lo que hubo de practicar una agricultura intensiva. Se allanaron terrazas en las pendientes y quebradas para contar con más suelo donde sembrar maíz, fríjoles y algodón. Las casas no estaban muy apiñadas; los espacios abiertos se dedicaron probablemente a la agricultura.

El algodón fue un producto importante en esta zona del imperio azteca. La manufactura doméstica de tejidos de algodón se convirtió pronto en la artesanía principal. En cada casa excavada se extrajeron grandes cantidades de utensilios de cerámica que servirían para hilarlo a mano. Una especie de abalorios o husos espiriformes facilitaban con su peso la retorcida de la hilada, y en unos pequeños cuencos sostenidos por trípodes se recogía y controlaba lo que se iba hilando. Según las fuentes documentales, todas las mujeres aztecas, desde la ínfima esclava hasta la dama noble de más alcurnia, hilaban y tejían. Los tejidos de algodón tenían dos usos económicos además de empleárselos para vestir. Eran, ante todo, el artículo más comúnmente exigido como tributo por las ciudades-estado y por el imperio azteca. En segundo lugar, se utilizaban como moneda de trueque con otros bienes y servicios en las plazas de mercado.

Además de tejidos, algunos manufacturaban papel de corteza de higuera borde, como lo prueban los hallazgos de "batidoras de corteza" labradas en basalto. Los aztecas usaban el papel para confeccionar sus libros de escritura pictográfica y para quemarlo en ofrendas rituales.

Las numerosas vasijas de cerámica usadas y desechadas que se encuentran en las casas las comprarían probablemente en los mercados. Aunque los alfareros locales producían una amplia gama de vasijas, la gente compraba también muchas piezas decoradas procedentes de otros sitios. Alrededor del 10 % de la cerámica excavada en estos yacimientos llegó del valle de México y de otras zonas. Y no es que esas vasijas fuesen funcionalmente mejores que las de fabricación local, sino que a la gente le gustaba disponer de otras con distintos motivos decorativos.

Además de cerámicas, los campesinos tenían en sus hogares otros bienes de procedencia foránea. Encontramos a millares trozos de lajas de obsidiana, cuyo origen geológico más cercano distaba 100 kilóme-

El imperio azteca



El imperio azteca abarcaba gran parte del México central y meridional cuando, en 1519 d.C., llegaron los conquistadores españoles. Los poblados descritos en el artículo formaban parte de las provincias tributarias de Cuauhnahuac y Huaxtepec, situadas en lo que es hoy el estado de Morelos. Los habitantes de estas provincias tenían que pagar cuatro veces al año fuertes tributos en especie —telas de algodón y otros productos— a la capital imperial, Tenochtitlán. —*M.E.S.*



tros de allí. Estas piezas de obsidiana, con sus muy cortantes bordes afilados, se utilizarían en actividades caseras y artesanales. Las agujas y otras piezas de bronce se importaban del México occidental. La sal se traía del valle de México, donde se obtenía por ebullición y evaporación del agua salada del lago; su transporte se hacía en orzas especiales, de las que hallamos muchos cascotes en las casas excavadas. El sistema de mercado puso en relación a los habitantes de estos poblados rurales con los del resto del imperio azteca y con otros de fuera de él.

Las excavaciones revelaron también otros aspectos de la vida campesina azteca, además de la economía. En cada casa había varios quemadores de incienso y unas figurillas de cerámica de formas humanas o de divinidades. Estos artefactos desempeñaban un papel en los rituales familiares propiciatorios de purificaciones y sanaciones. Tales ceremonias complementaban las celebraciones públicas, más espectaculares, que tenían lugar sobre las pirámides escalonadas de los templos de la capital y de las ciudades principales. Los sacerdotes españoles que llegaron allí con la conquista nos transmitieron el contenido de la religión pública de los aztecas, y la excavación del Gran Templo ha dado a conocer el escenario de aquellos ritos. Pero antes de las recientes excavaciones de casas, se desconocía la naturaleza de los rituales domésticos.

No es raro que Cuexcomate, población mayor que Capilco, fuese también una comunidad más compleja. La ciudad estaba construida en torno a una plaza pública, en cuyo lado este había una pequeña pirámide-templo. Al otro lado de la plaza, frente al templo, había un recinto residencial de 540 metros cuadrados de superficie, bastante más amplio que las demás casas. Sus habitaciones sobresalían del nivel del suelo por unas plataformas de piedra. En el palacete, proyectado con esmero mayor que el resto de las viviendas, se emplearon también materiales de construcción más elaborados, enlucido de yeso incluido. Estas características, junto con las del plano de su planta, similar al de los palacios aztecas, nos llevaron a la conclusión de que el recinto fue la residencia de una familia noble.

Los artefactos dejados por los nobles que vivieron en este palacete diferían en cantidad, pero no en especie, de los que encontramos en las casas de la gente común. Por ejemplo, como era de esperar, el recinto dio cantidades significativamente mayores de cerámicas decoradas e importadas que las que dieron las casas de los plebeyos. Sin embargo, los nobles no usaron en exclusiva ningún tipo de utensilio artesanal. Bienes importados muy costosos, tales como cuencos polícromos procedentes del centro religioso de Cholula, objetos de bronce y joyas de jade, los encontramos tanto en las casas plebeyas como en la residencia noble, lo que demuestra que ambos grupos tenían fácil acceso al amplio sistema mercantil azteca del México central.

Con la conquista de esta región por el imperio azteca, hacia el año 1440 d. C., comenzó el período azteca B reciente. Poco después, se abandonó el palacete de Cuexcomate y la nueva élite se hizo construir en el lado norte de la plaza otro recinto de menores dimensiones. La población siguió aumentando: Cuexcomate pasó de 200 a 800 habitantes, y Capilco de 35 a 135 durante el período azteca B reciente. Los agricultores hubieron de construir extensas terrazas para alimentar a una población creciente, pero cuando toda la tierra disponible estuvo terraplenada empezó a ir en mengua el rendimiento de los cultivos.

Los restos de utensilios y de edificios revelan el nivel de vida. La arqueología de los asentamientos nos habla de una notoria decadencia entre los períodos A y B. Así, durante el período reciente, nobles y plebeyos importaron menos bienes y poseyeron menos vasijas de cerámica decorada. Los índices de riqueza, que nosotros calculamos por las cantidades de artefactos valiosos hallados en cada casa, fueron en continuo declive. Algunos plebeyos trataron de superar las dificultades económicas aumentando su producción de tejidos. En cada yacimiento, las casas en que había mayor número de útiles para hilar el algodón eran las de índice de riqueza más bajo. Dicho de otro modo, las familias más pobres eran las que mayores esfuerzos ponían en la producción artesanal, probablemente para compensarse de los menguados rendimientos de los cultivos o de la falta de tierra. Así ha sucedido en muchas partes del mundo, siempre que la superpoblación y la escasez de tierra han hecho que baje el nivel de vida.

Para completar nuestro estudio de la vida provinciana volvimos a Yautepec, capital de una poderosa ciudad-estado en tiempos de los aztecas. Las que fueron ciudades aztecas del México central siguen estando hoy habitadas, con sus ruinas soterradas bajo los estratos de los sucesivos asentamientos. Los primeros españoles edificaron iglesias sobre las ruinas de las pirámides y establecieron sus propias ciudades sobre las ciudades aztecas. A este respecto, Yautepec es rara excepción, pues allí el asentamiento hispano cubrió sólo una parte de la ciudad. En 1989, Hortensia de Vega dirigió a un equipo de arqueólogos del Instituto Nacional de Antropología de México en la excavación de un extenso montículo, en los aledaños de la actual Yautepec. El montículo en cuestión resultó ser las ruinas del palacio real de Yautepec. Se trata del único palacio azteca que ha sido totalmente excavado. A nosotros se nos invitó a colaborar en Yautepec estudiando las casas de otras partes de la ciudad antigua.

Por entonces se sabía muy poco sobre las ciudades aztecas, exceptuada Tenochtitlán. Aunque los arqueólogos habían recogido muchos restos superficiales de ciudades del valle de México, nadie había excavado nunca casas aztecas urbanas. La primera campaña, en 1992, la dedicamos a un examen de superficie para determinar la extensión y la importancia del asentamiento azteca. Aun dentro de la ciudad moderna no fue difícil rastrear la extensión de la antigua Yautepec, que no pasaba mucho de los dos kilómetros cuadrados. En 1993 volvimos para excavar casas. Empezamos con catas en campo abierto y en terrenos despejados; encontramos siete casas con sus correspondientes patios.

Las excavaciones de Yautepec sacaron a la luz densas concentraciones de objetos artesanales, y en seis meses de trabajo de campo recuperamos 1,2 millones de fragmentos cerámicos y cerca de 50.000 artefactos de obsidiana, principalmente hojas de cuchillo y otros útiles. La clasificación y el estudio de estos materiales están todavía en curso, pero los resultados

provisionales revelan ya muy sugerentes semejanzas y diferencias con respecto a lo hallado en Cuexcomate y en Capilco.

Cinco de las siete casas excavadas en Yautepec fueron pequeños habitáculos de plebeyos, con una superficie promedia de 26 metros cuadrados. Como sus equivalentes rurales, estas casas se hicieron de ladrillo de adobe sobre cimientos de guijarros argamasados. Excavamos también una residencia noble que tenía una extensión mucho mayor (430 metros cuadrados) que las de las casas plebeyas y en la que se había hecho mucho más uso de la cal, del yeso y de la piedra labrada. Otra casa era una mal conservada estructura de un tamaño intermedio (80 metros cuadrados) cuya asociación a una clase social no está clara.

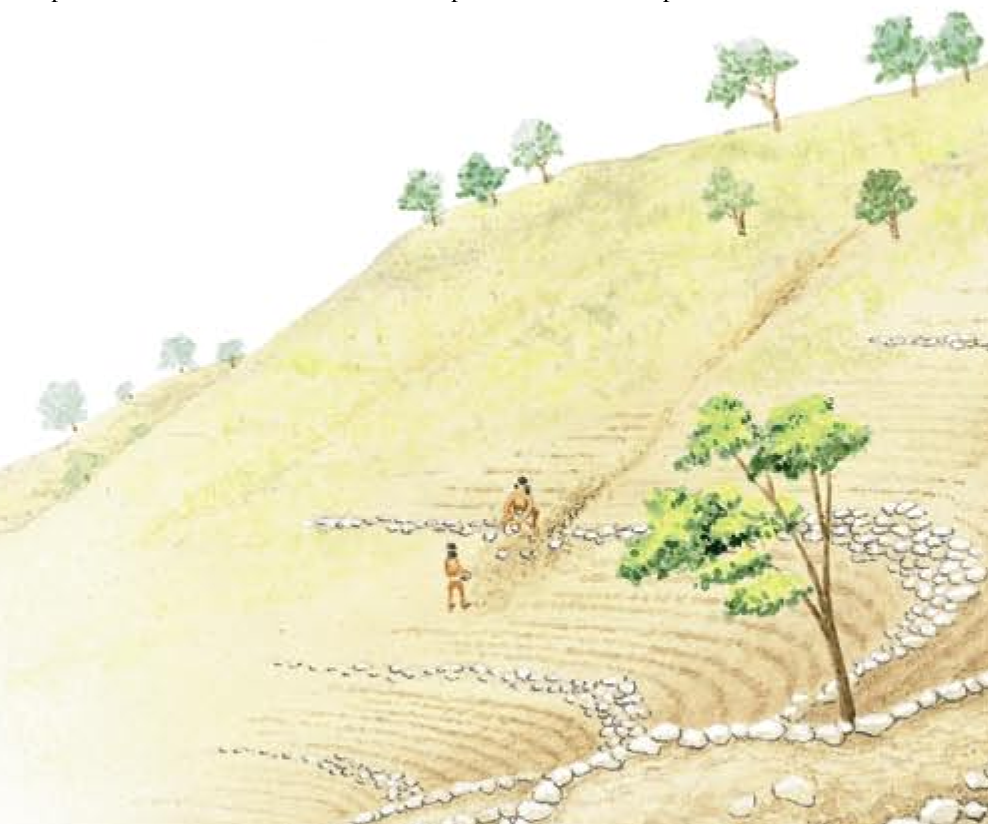
El pueblo llano de Yautepec, lo mismo que sus paisanos de Capilco y de Cuexcomate, tenía fácil acceso a los productos foráneos. Los mismos tipos de cerámicas importadas, así como la obsidiana, la sal, el jade y el bronce, se encontraron en las residencias de Yautepec. Sin embargo, no podemos hacer comparaciones cuantitativas hasta que se complete el estudio de todos los artefactos. Una serie de análisis técnicos que se están llevando a cabo determinarán los lugares de origen de materias primas que sirvieron para hacer diversos artefactos en Yautepec. Lo que por ahora sabemos es que la mayor parte de la obsidiana provenía de los alrededores de Pachuca, una ciudad norteña del valle de México. Para determinar la procedencia geológica de los artefactos de obsidiana nos servimos de técnicas de fluorescencia de rayos X. Los estudios de la composición de las cerámicas, incluidos la petrografía de sección fina y los análisis de activación de neutrones, ayudarán a distinguir la loza fabricada en el valle de Yautepec de la importada de otras partes del México central.

Ya conocemos el origen de los artefactos de bronce. Dorothy Hosler, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, analizó la composición química, la estructura y las propiedades metalúrgicas de los artefactos metálicos de los tres yacimientos. Inclúyense entre estos objetos agujas de coser, leznas, pinzas y cascabeles, compuestos todos ellos de bronce en aleaciones de cobre y estaño o de cobre y arsénico. Morelos no producía antaño metales, y estos artefactos se parecen mucho a los artefactos de bronce fabricados en el imperio tarasco del México occidental.

Hosler ha realizado la primera aplicación del análisis con isótopos de plomo a la metalurgia de la antigua Mesoamérica tomando muestras de mena en varias zonas y artefactos de diversos asentamientos, incluido Yautepec. Bastantes de los objetos de bronce de Yautepec cuadran del todo con muestras de mena procedentes del territorio tarasco. Aunque las fuentes escritas informan de que los aztecas y los tarascos guerreaban constantemente entre sí, en cambio las excavaciones proporcionan pruebas evidentes de que el bronce y la obsidiana de Tarasco cruzaban en intercambio comercial la frontera y a través del sistema mercantil azteca llegaban hasta el pueblo llano de las provincias.

A diferencia de los emplazamientos rurales, Yautepec tuvo numerosas industrias artesanas además de la producción textil doméstica. Algunas familias se dedicaban a hacer cuchillos de obsidiana; se han hallado también vestigios de la producción de pendientes para los labios y para las orejas y otras alhajas de obsidiana. Recuperamos también moldes que se empleaban para hacer los abalorios espiriformes y las figurillas de cerámica. Aunque estos moldes no abundan, han aparecido en diversos puntos excavados en Yautepec. También se han desenterrado molinillos para hacer pasta de papel. Parece, pues, demostrado que el pueblo llano de Yautepec se dedicaba a distintas manufacturas, no sólo a la textil del algodón.

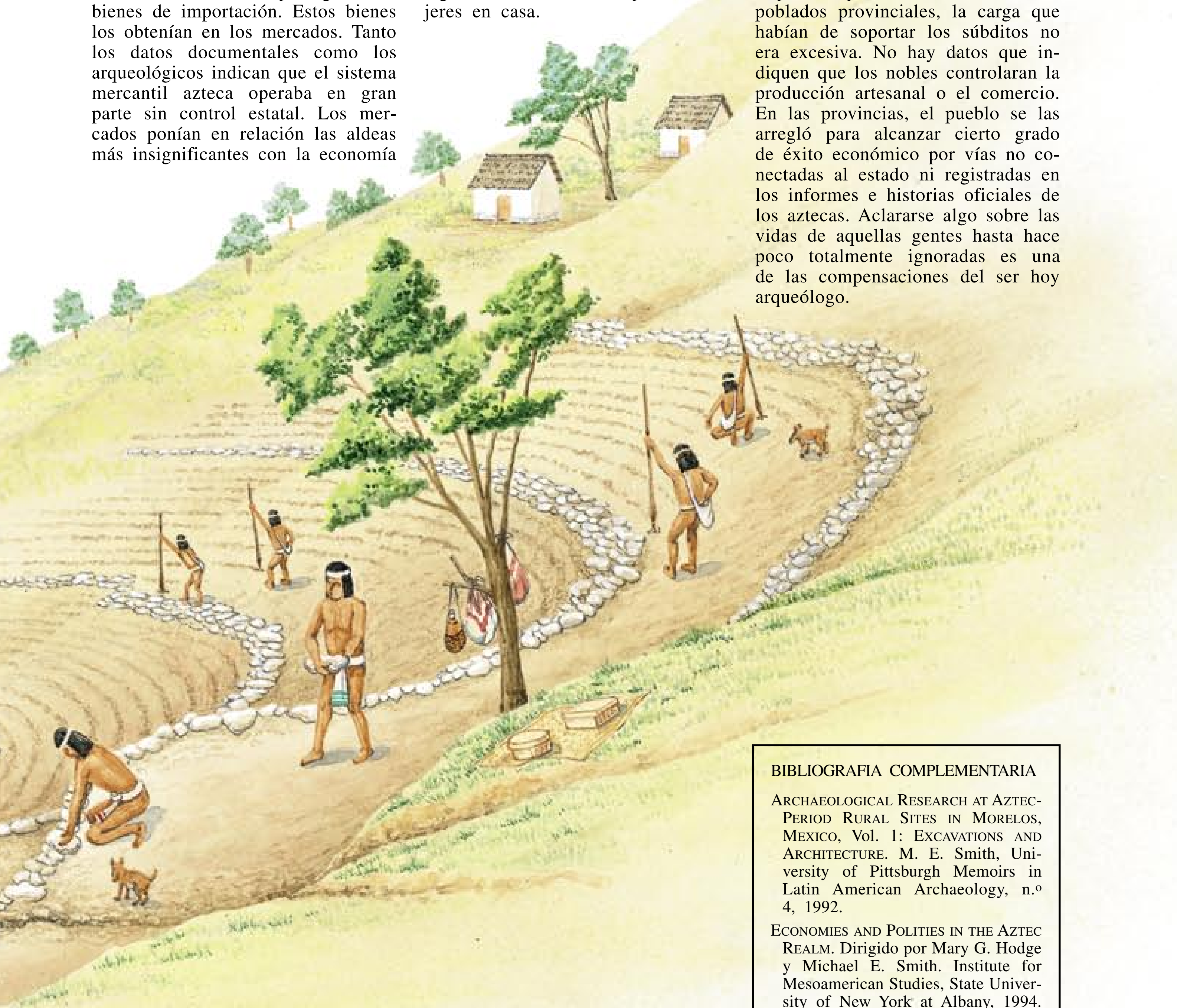
¿Qué nos dicen estas excavaciones sobre la población que vivía en las provincias del imperio azteca? La



3. LAS PRACTICAS AGRICOLAS INTENSIVAS se hicieron imprescindibles para satisfacer la demanda de la población azteca, que aumentó en proporciones explosivas durante el siglo XV. Los campesinos tuvieron que acondicionar en forma de terrazas —o terraplenes de contención— las laderas de barrancos que, si no, eran yermas e inservibles; reteniendo la tierra que antes se perdía con la erosión y las torrenteras de las grandes lluvias, podían convertirse en fértiles bancales. Para ello, apilaban hileras de pedruscos en tandas sucesivas, de modo que la terraza se fuese formando con las capas de la tierra que, al deslizarse ladera abajo con el agua, se iba depositando entre y sobre los pedruscos. Cada hilera de éstos la adosaban por detrás a la anterior, pero sin unirlas con argamasa o mortero alguno. Así los escalonados muretes de las terrazas quedaban un tanto inclinados, y a menudo las fuertes lluvias abrían en ellos brechas, como la que vemos en fase de reparación a la izquierda de la ilustración. En los bancales de estas terrazas los campesinos cultivaban preferentemente maíz, fríjoles y algodón.

impresión general es que la gente de provincias, emprendedora, vivía con bastante prosperidad. A pesar del declive económico que siguió a la conquista y a la incorporación al imperio azteca, la población urbana y la rural continuaron teniendo fácil acceso a una amplia gama de bienes de importación. Estos bienes los obtenían en los mercados. Tanto los datos documentales como los arqueológicos indican que el sistema mercantil azteca operaba en gran parte sin control estatal. Los mercados ponían en relación las aldeas más insignificantes con la economía azteca del centro de México. Los miembros de las familias realizaban diversas actividades artesanales para producir bienes que vendían en los mercados. En emplazamientos de Morelos los más importantes de esos productos fueron los tejidos de algodón manufacturados por las mujeres en casa.

Las fuentes escritas nos dicen que los aztecas plebeyos estaban sometidos a los nobles y que éstos poseían la mayor parte del territorio y monopolizaban el poder dentro de sus ciudades-estado. Las excavaciones arqueológicas nos inclinan a pensar que, al menos en varios poblados provinciales, la carga que habían de soportar los súbditos no era excesiva. No hay datos que indiquen que los nobles controlaran la producción artesanal o el comercio. En las provincias, el pueblo se las arregló para alcanzar cierto grado de éxito económico por vías no conectadas al estado ni registradas en los informes e historias oficiales de los aztecas. Aclararse algo sobre las vidas de aquellas gentes hasta hace poco totalmente ignoradas es una de las compensaciones del ser hoy arqueólogo.



BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

ARCHAEOLOGICAL RESEARCH AT AZTEC-PERIOD RURAL SITES IN MORELOS, MEXICO, Vol. 1: EXCAVATIONS AND ARCHITECTURE. M. E. Smith, University of Pittsburgh Memoirs in Latin American Archaeology, n.º 4, 1992.

ECONOMIES AND POLITIES IN THE AZTEC REALM. Dirigido por Mary G. Hodge y Michael E. Smith. Institute for Mesoamerican Studies, State University of New York at Albany, 1994.

THE AZTECS. Michael E. Smith. Blackwell Publishers, 1996.

COPPER SOURCES, METAL PRODUCTION, AND METALS TRADE IN LATE POSTCLASSIC MESOAMERICA. Dorothy Hosler y Andrew Macfarlane en *Science*, vol. 273, págs. 1819-1824; 27 de septiembre, 1996.

Las ondas gravitatorias

En los primeros años del nuevo milenio entrarán en funcionamiento varios dispositivos para detectar las ondas gravitatorias. De confirmarse su existencia, se abriría una nueva ventana para la observación del cosmos

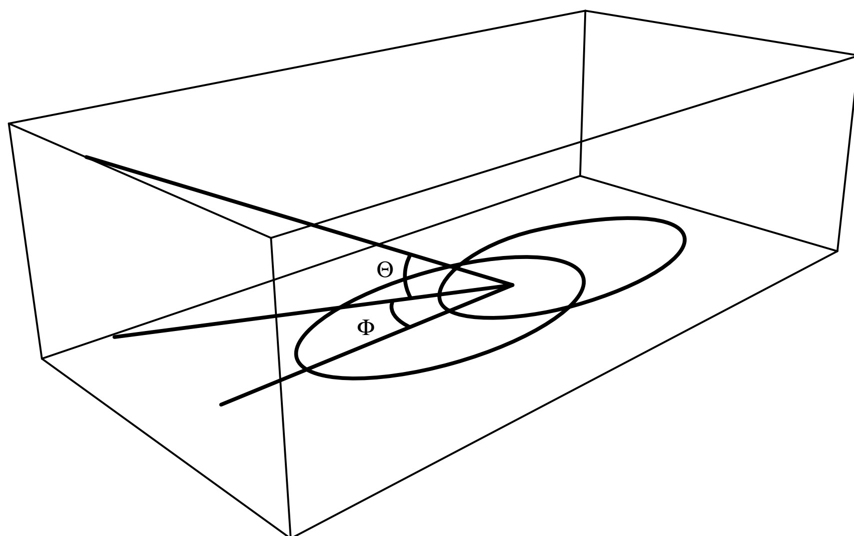
Jesús González de Buitrago y Evencio Mediavilla

Casi todos los avances substanciales en nuestra comprensión del mundo físico se han realizado al aparecer un conflicto entre las predicciones de una teoría y los resultados de un determinado experimento. Teorías que ahora nos parecen manifiestamente erróneas, como la concepción geocéntrica del universo, se mantuvieron vigentes durante siglos debido a que las técnicas de la época no permitían poner de manifiesto su falsedad.

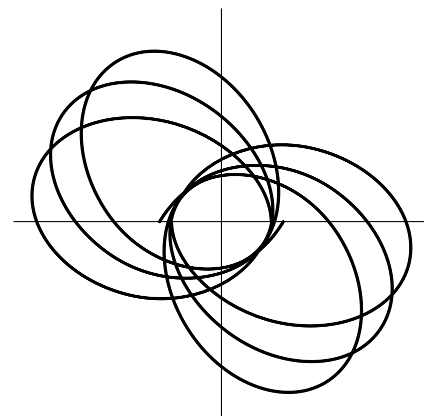
Situándonos en tiempos más cercanos, encontramos que las dos grandes revoluciones de nuestro siglo, la teoría de la relatividad y la mecánica cuántica, difícilmente podrían haber tenido lugar sin las dos crisis que las propiciaron: el problema de la constancia de la velocidad de la luz y el de la distribución de frecuencias en la radiación del cuerpo negro. El primer problema ofrece un ejemplo claro de aparente contradicción entre teoría y experimentación. Nuestra intuición nos conduce de manera natural a predecir que el movimiento de la fuente emisora imparte cierta inercia a la propia luz y que, por tanto, la velocidad de la luz se ve afectada por el movimiento de la fuente. El experimento encaminado a verificar este punto, realizado en 1887, fue de suma importancia para la evolución consiguiente de la física y su resultado negativo (la velocidad de la luz en el vacío es siempre la misma, con independencia del movimiento de la fuente) determinó uno de los cambios más drásticos en la historia de la ciencia.

Durante los primeros años del nuevo milenio es posible que un nuevo experimento decida si la concepción del mundo físico acuñada a lo largo de los últimos cien años es correcta. En esta ocasión se trata de averiguar si las ondas gravitatorias tienen o no existencia real.

Antes de abordar el origen y las propiedades de las ondas gravitatorias, conviene repasar las características, mucho más familiares, de las ondas electromagnéticas. Si se resuelven las ecuaciones de Maxwell para un sistema de cargas en movimiento acelerado, localizadas en determinada región del espacio, se obtiene una solución general para el campo electromagnético que presenta comportamientos muy diferentes según la distancia del observador a las cargas. En la zona próxima, el campo eléctrico es esencialmente radial. En



1. LOS SISTEMAS BINARIOS generan ondas gravitatorias. Se representan aquí las órbitas de un sistema de estrellas binarias alrededor del centro de masas. La dinámica orbital de tales sistemas es bastante sencilla. El plano de la binaria forma un ángulo (Θ) con la dirección en la que está situado el observador. Asimismo, el eje mayor de la elipse forma otro ángulo (Φ) con la proyección de la dirección del observador en el plano que contiene a la binaria.

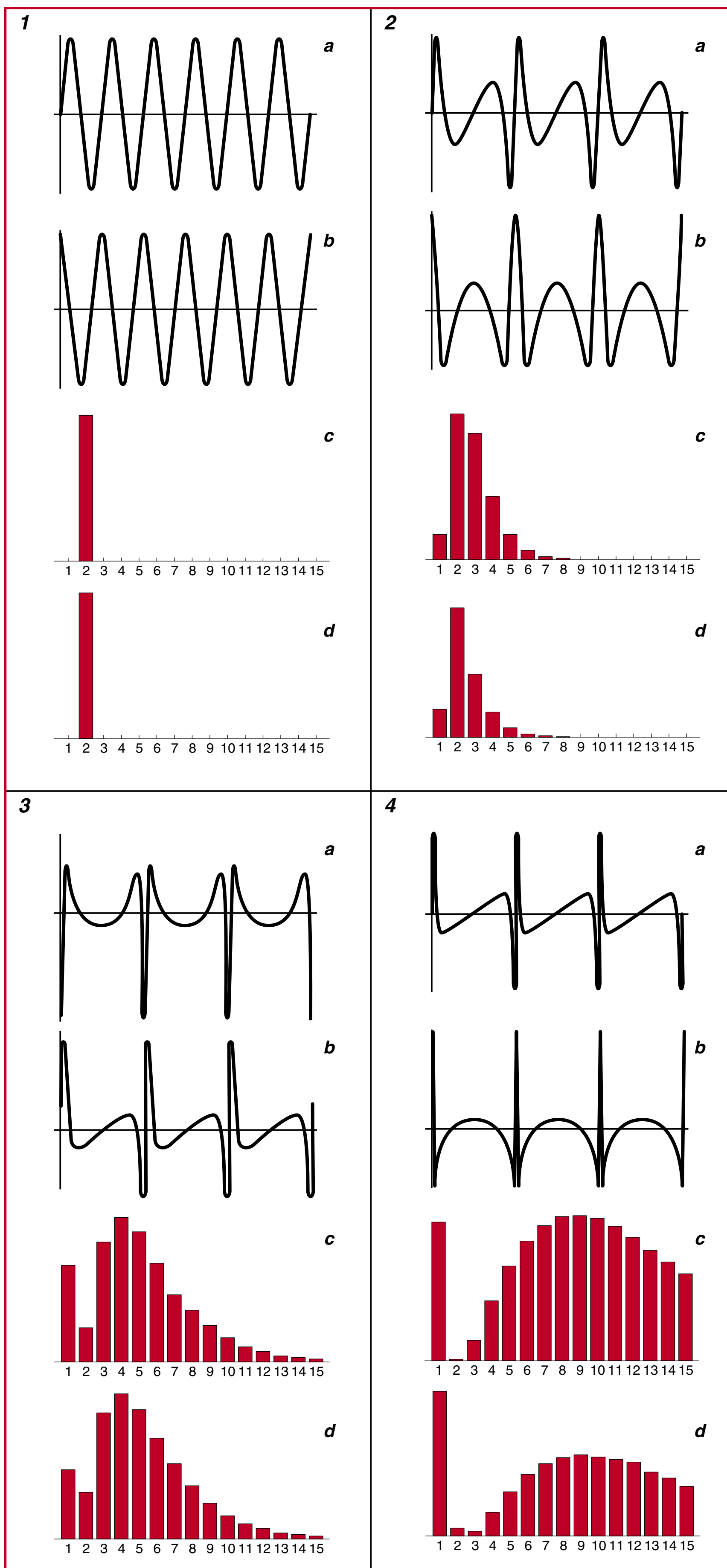


2. AVANCE DEL PERIASTRO. Según predice la teoría general de la relatividad, las órbitas que describen las estrellas de un sistema binario no son curvas cerradas, sino que experimentan lo que se denomina avance del periastro (fase de máximo acercamiento entre las estrellas del sistema). Debido a este efecto, las órbitas de las estrellas del sistema binario trazan elipses que cambian continuamente la orientación de sus ejes. El avance del periastro afecta a la forma de las ondas gravitatorias emitidas por el sistema, modulando la amplitud.

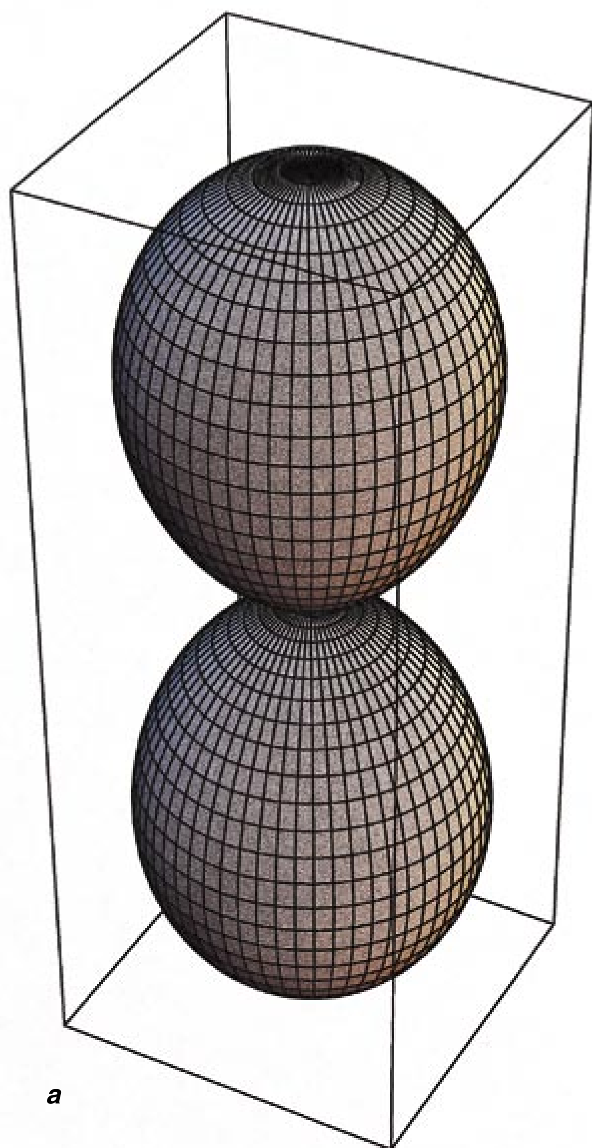
esta región, la dependencia del campo con la distancia es función de la distribución espacial de las cargas.

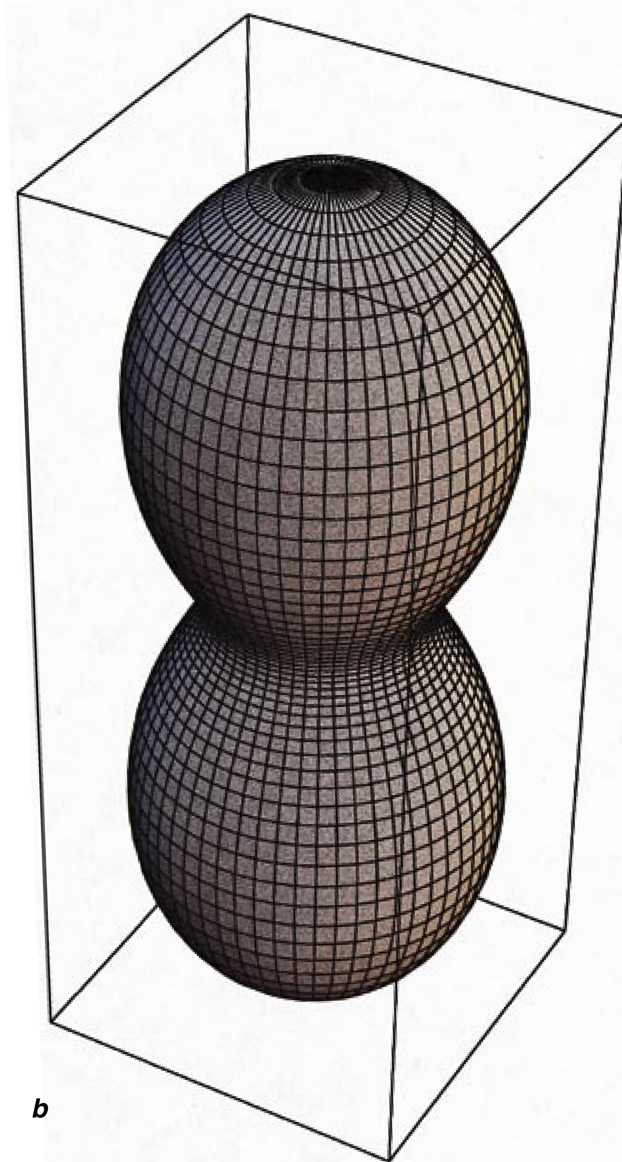
En la zona alejada, el campo eléctrico es transversal. Su intensidad decrece con la distancia en forma inversamente a ésta y su módulo o amplitud, a su vez, cambia con el tiempo en forma oscilatoria. Todas estas características son típicas de los campos de radiación y el comportamiento del campo en la zona lejana a las fuentes es lo que se conoce como solución ondulatoria o radiativa.

Una onda gravitatoria consiste en una perturbación originada por una distribución de masas en movimiento que se desplaza a la velocidad de la luz. Dicha perturbación altera la geometría del espacio y acelera entre sí a pequeñas masas de prueba a su paso. (Llamamos masas de prueba a



3. FORMA Y DESCOMPOSICION espectral de las ondas gravitatorias emitidas por estrellas binarias de diferentes parámetros orbitales. La amplitud de la onda y su espectro de frecuencias dependen básicamente de la excentricidad. Cuando la radiación gravitatoria viene emitida por una binaria de excentricidad nula, esto es, de órbitas circulares (*1*), las amplitudes de las dos polarizaciones del campo gravitatorio, $h_\times$(a), h_+(b), son ondas sinusoidales con una única frecuencia doble de la frecuencia orbital. Como consecuencia, en las distribuciones espectrales de la señal, $h_\times$(c), h_+(d), aparece solamente el segundo armónico. Consideremos a continuación la emisión gravitatoria de un sistema binario de excentricidad moderada (*2*), con sus amplitudes, $h_\times$(a), h_+(b), y sus espectros, $h_\times$(c), h_+(d), correspondientes; en este caso, aunque el segundo armónico sigue siendo dominante, la forma de la onda se aparta bastante de una sinusoide y la emisión se reparte en los armónicos próximos al segundo. Esta tendencia se ve acentuada en la figura siguiente (*3*), en la que se han representado la amplitud, $h_\times$(a), h_+(b), y el espectro, $h_\times$(c), h_+(d), de la radiación gravitatoria emitida por un sistema real, el púlsar binario PSR 1913+16. Los parámetros orbitales de este sistema de excentricidad alta se han podido determinar experimentalmente con mucha precisión. Según puede apreciarse, el máximo de la emisión corresponde a una frecuencia cuatro veces la fundamental de la órbita. Por último (*4*), se ilustran las amplitudes, $h_\times$(a), h_+(b), y espectros, $h_\times$(c), h_+(d), de los campos emitidos por una binaria muy excéntrica. Se advierte que la emisión está muy repartida en frecuencias y los armónicos significativos se extienden incluso más allá de la región de frecuencias representada en la figura.





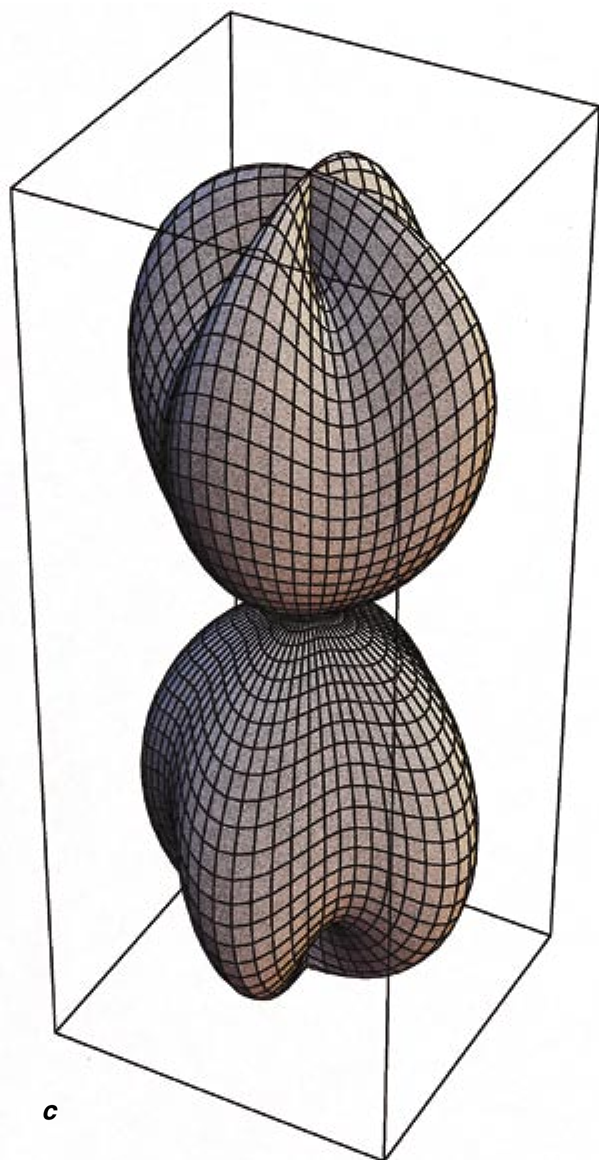
4. DISTRIBUCION ANGULAR de la potencia emitida. En estos diagramas de radiación, análogos a los diagramas de antena para la radiación electromagnética, se puede ver la influencia de la orientación del plano orbital de la binaria y de su excentricidad en la intensidad de la radiación gravitatoria recibida. En *a* y *b* se han representado los diagramas de radiación correspondientes a una binaria de excentricidad nula para las polarizaciones $h_\times$ y h_+, respectivamente. La radiación es máxima en la dirección perpendicular al plano de la binaria y mínima en cualquiera de las direcciones contenidas en el

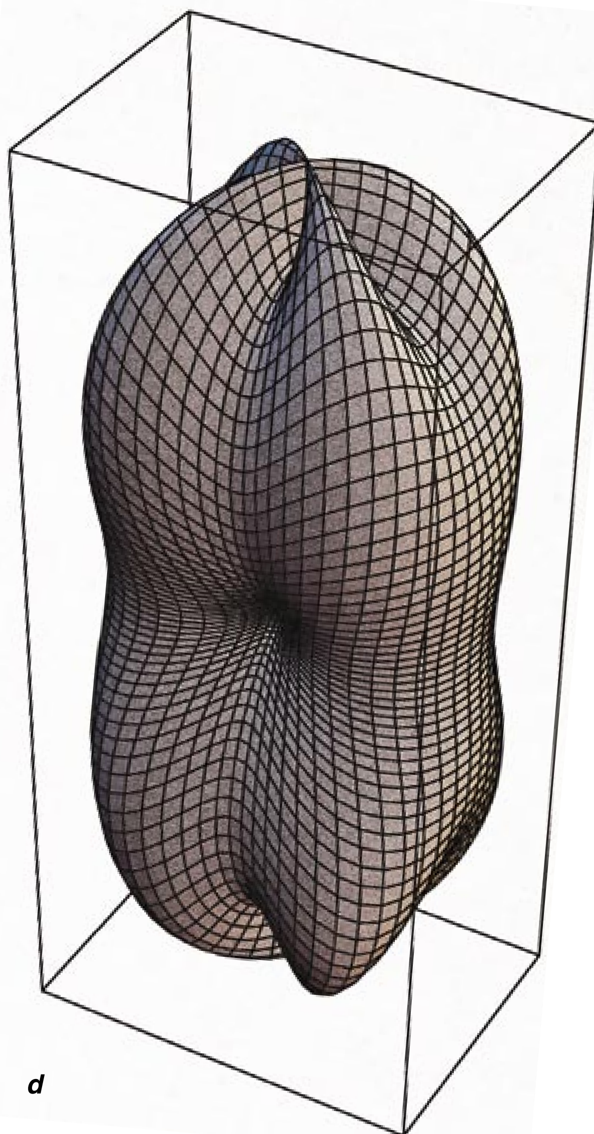
cuerpos con masas suficientemente pequeñas como para no perturbar en forma apreciable el propio campo gravitatorio.) Desde el punto de vista formal, las ondas gravitatorias son una consecuencia de las soluciones dependientes del tiempo de las ecuaciones de Einstein. Tales ecuaciones definen el campo gravitatorio, igual que las de Maxwell describen el campo electromagnético.

Las soluciones dependientes del tiempo de las ecuaciones de Einstein son una consecuencia directa del principio de causalidad: las interacciones se propagan a velocidad finita. Ahora bien, la existencia de un campo que depende de la magnitud tiempo no implica necesariamente la existencia de soluciones radiativas. Para estar seguros de la existencia de ondas gravitatorias sería necesario resolver las ecuaciones de Einstein y comprobar, como se hace en el caso del electromagnetismo, que pueden identificarse términos radiativos en la solución correspondiente al campo gravitatorio creado por una distribución de masas en movimiento. Sin embargo, esto resulta sumamente difícil ya que, a diferencia de las ecuaciones de Maxwell, las de Einstein no son lineales; en ellas no es válido el principio de superposición (la suma de dos soluciones no es solución).

En las ecuaciones propuestas por Einstein para describir el campo gravitatorio, la magnitud fundamental es el tensor métrico *g* o potencial gravitatorio cuyas componentes no nulas (diez al tratarse de un tensor simétrico) determinan las propiedades geométricas del espacio-tiempo. Dicho objeto geométrico resulta de la distribución de materia.

La falta de linealidad en las ecuaciones del campo gravitatorio hace muy difícil encontrar soluciones generales que correspondan a situaciones físicas de interés. Esa es la razón por la que no se ha dado todavía con la solución exacta del sistema formado por dos cuerpos, dos estrellas por ejemplo, que se mueven en una órbita bajo la acción de su propia interacción gravitatoria, ni siquiera en el caso





plano de dicho sistema binario. (En el caso de $h_\times$ la potencia radiada se anula en el plano de la binaria.) En $c\,(h_\times)$ y $d\,(h_+)$ se han representado los diagramas correspondientes a la suma de los primeros veinte armónicos del campo en un caso de excentricidad extrema. Aunque la forma de las distribuciones angulares tiene muchas características comunes con el caso circular, cuando la excentricidad es alta los diagramas no tienen simetría de revolución respecto al eje mayor. En *c* y *d* se hace patente el desfase de $\pi/4$ entre las dos polarizaciones del campo, $h_\times(c)$ y $h_+(d)$.

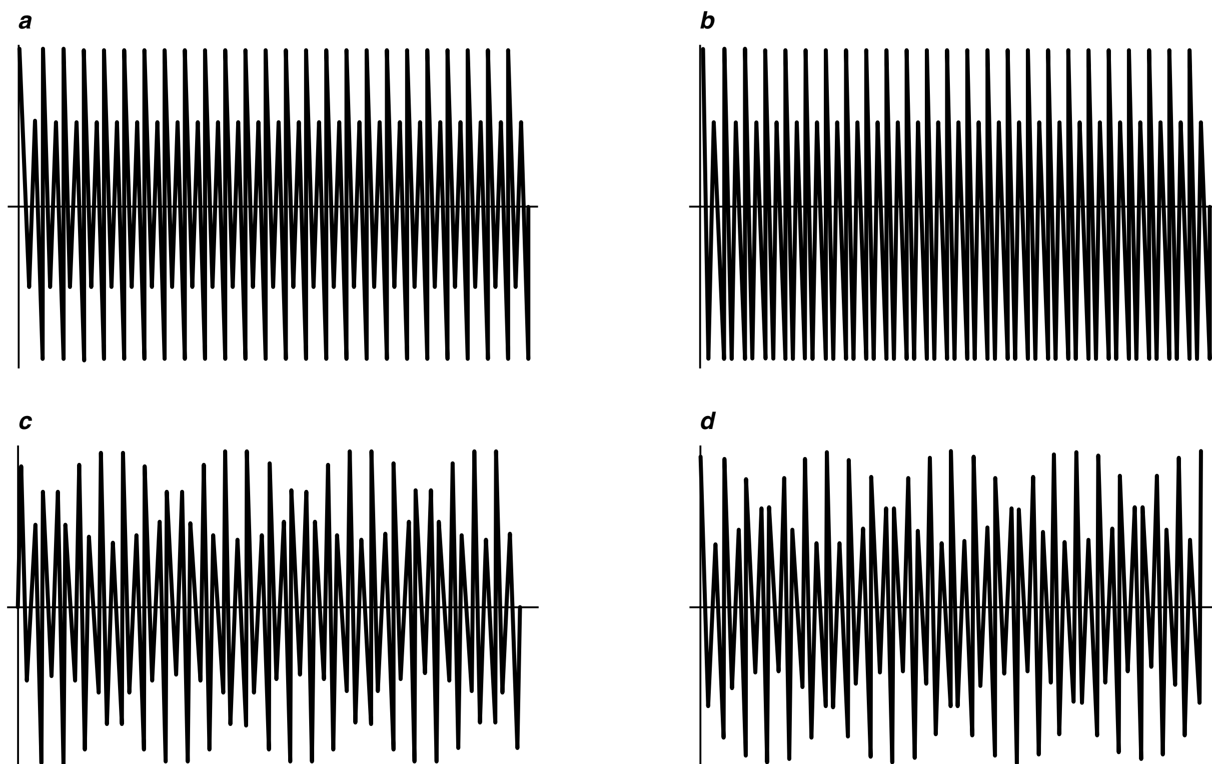
más simple de una presunta órbita circular.

En principio, un tal sistema binario constituiría la fuente natural más sencilla de ondas gravitatorias. El análisis del campo dependiente del tiempo correspondiente a la solución exacta permitiría saber si tiene comportamiento ondulatorio y adquirir una comprensión completa de sus propiedades. Al no disponer de este tipo de soluciones, el conocimiento que poseemos sobre la polarización de las ondas y el espín de los cuantos del campo asociado, entre otras propiedades, está basado en la aproximación lineal a las ecuaciones de Einstein.

Pero la teoría lineal tiene sus limitaciones. Una de ellas es que sólo podemos predecir la forma de las ondas en los sistemas en que el propio campo gravitatorio sea débil. En el caso de campos intensos, propios de dos agujeros negros o estrellas de neutrones que se muevan en una órbita muy próxima (con un radio orbital del orden de algunos kilómetros), al no conocer el campo gravitatorio, difícilmente podremos predecir la forma exacta de la radiación.

Pese a todo, las observaciones realizadas en el púlsar binario de Hulse-Taylor parecen confirmar, aunque sea indirectamente, las predicciones de la teoría lineal. Este púlsar, descubierto en 1974 con el radiotelescopio de Arecibo por Russell A. Hulse y Joseph H. Taylor, constituye uno de los pocos sistemas binarios estudiados cuyas componentes están lo suficientemente próximas como para que la radiación emitida produzca efectos mensurables.

Los dos únicos campos clásicos que se manifiestan a escala macroscópica son el campo electromagnético y el campo gravitatorio. Casi todas nuestras nociones sobre las propiedades de las ondas que se propagan en el vacío las hemos adquirido mediante el estudio de la radiación electromagnética. En el caso de la gravitación, como ya hemos indicado, es necesario recurrir a la aproximación lineal para estudiar las soluciones de tipo ondulatorio. Cuando adoptamos



5. MODULACION de la amplitud de la onda gravitatoria inducida por el avance del periastro. La forma básica de la onda gravitatoria emitida por una binaria, $h_{\times}(a)$ y $h_{+}(b)$, se ve modulada por el efecto relativista del avance del periastro, $h_{\times}(c)$ y $h_{+}(d)$. En cada figura se han representado 24 períodos de la binaria. El avance del periastro por revolución orbital es de $\pi/6$. La modulación de amplitud generaría la subdivisión de los armónicos fundamentales en dobletes ($h_{\times}$) y en tripletes (h_{+}). Si los armónicos sin considerar precesión correspondían a frecuencias n/T (T es el tiempo que tardan las estrellas en completar una revolución orbital), las frecuencias del doblete ($h_{\times}$) serán $(n - 1/12)/T$ y $(n + 1/12)/T$. En el caso del triplete (h_{+}) quedará, además, un armónico a la frecuencia original n/T.

cierto artificio, la calibración (gauge) de Lorentz, así llamada en honor de Hendryck van Lorentz, las ecuaciones fundamentales que describen ambos campos son ecuaciones en derivadas parciales idénticas para cada una de las componentes de los potenciales que caracterizan al campo electromagnético y al campo gravitatorio. Como veremos, en el número de componentes de ambos potenciales aparece una primera diferencia fundamental.

Mas, a pesar de su similitud formal, existe una diferencia esencial entre las soluciones de carácter radiativo de las ecuaciones que describen ambos campos. Mientras que para las ondas electromagnéticas el modo fundamental es de carácter dipolar, en el caso gravitatorio aparece radiación cuadrupolar como forma predominante, es decir, la forma del campo de radiación es más compleja en el caso gravitatorio que en el electromagnético. Esta diferencia está ligada a aspectos tan fundamentales, que diferencian ambos campos, que merece la pena analizar su origen con mayor atención. En el desarrollo multipolar de los campos radiativos, tanto electromagnético como gravitatorio, aparecen términos que dependen del cociente "carga/masa inercial". En el caso del campo electromagnético esta relación puede tomar valores arbitrarios, negativos y positivos, ya que la carga eléctrica es independiente de la masa inercial. Sin embargo, en el caso de la gravedad la relación entre la "carga del cuerpo" (masa gravitatoria) y la masa inercial es siempre constante y del mismo signo. Por este motivo no puede existir radiación dipolar gravitatoria y hay que considerar términos adicionales en el desarrollo multipolar de los potenciales gravitatorios para tener soluciones radiativas no nulas.

Si en los futuros experimentos se produce la detección de ondas gravitatorias, habrá que comprobar que sus modos de polarización se ajustan a los predichos por la teoría lineal. Hasta ahora no se ha podido construir una teoría cuántica del campo gravitatorio enteramente satisfactoria, debido, en parte, a que se trata de un campo con cuantos de masa nula y espín dos. Dentro del formalismo cuántico, a un campo clásico, como el electromagnético o el gravitatorio, se le asocia un conjunto prácticamente infinito de partículas llamadas "cuantos del campo". Así decimos que los cuantos del campo gravitatorio son unas partículas llamadas "gravitones", de la misma manera que hablamos de fotones como cuantos del campo electromagnético. El número de componentes independientes de los potenciales de un campo está íntimamente asociado al espín de sus cuantos. El espín de los fotones es igual a uno, lo cual implica que el número de componentes independientes del potencial sea tres. El hecho de tener los fotones masa nula permite reducir todavía el número de componentes independientes (o estados de polarización de las ondas electromagnéticas) a dos. En el caso del campo gravitatorio, la teoría predice que sus cuantos deben tener

espín dos y masa nula, con lo que también pueden reducirse los estados de polarización (o componentes independientes del potencial gravitatorio) de las ondas gravitatorias de cinco a dos. Esta característica de las ondas gravitatorias ocasiona dificultades a la hora de formular una teoría cuántica del campo gravitatorio que no han podido todavía ser superadas. Para ser aceptada cualquier teoría como correcta, sus ecuaciones deben resultar invariantes frente a cualquier cambio de sistema de referencia inercial (invariancia Lorentz) o, en el caso de la relatividad general, frente a cambios arbitrarios de sistema de referencia, sean o no inerciales (covariancia general). La posibilidad de reducir a dos las componentes independientes del potencial gravitatorio resulta incompatible con la invariancia Lorentz al aparecer otras componentes, no deseadas, cuando cambiamos de sistema de referencia inercial.

Resultaría del máximo interés que los experimentos de detección de ondas gravitatorias que se pondrán en marcha a comienzos del nuevo milenio probasen la existencia de las mismas y revelasen características no previstas por la teoría lineal. La imposibilidad, hasta ahora, de unificar la relatividad general con la teoría cuántica en una sola teoría más fundamental parece sugerirnos que andamos errados por lo que concierne a las bases de la teoría clásica, de la teoría cuántica o de ambas.

En general, cualquier sistema dinámico en el que no exista simetría esférica constituye una fuente potencial de ondas gravitatorias. Se han propuesto como posibles emisores de radiación gravitatoria muchos objetos de nuestra galaxia, y de fuera de ella, que cumplen con esta condición. Pero nos encontramos muy lejos de conocer los procesos dinámicos que generan las ondas gravitatorias, salvo en el caso de los sistemas binarios de estrellas que orbitan una alrededor de la otra.

Revisten particular interés los sistemas binarios de estrellas muy compactas (enanas blancas y estrellas de neutrones) o que han experimentado un colapso gravitatorio (agujeros negros de origen estelar). La radiación gravitatoria emitida aumenta cuando disminuye el tamaño del sistema; así, dos estrellas de neutrones con radios del orden de 10 km pueden formar una binaria de mucho menor tamaño que dos estrellas de tipo solar (cuyo radio mide en torno a los 700.000 km).

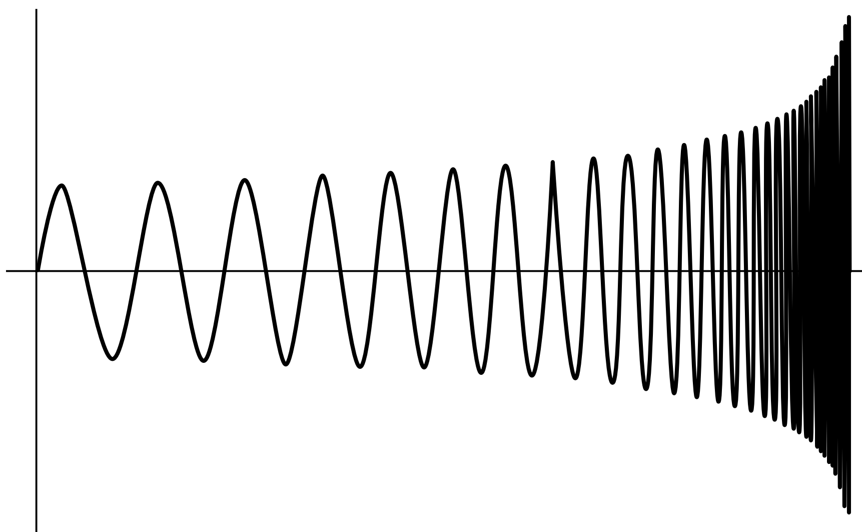
Por otro lado, la dinámica orbital de los sistemas dobles de objetos compactos es bastante sencilla. En casi cualquier circunstancia, las estrellas compactas de una binaria pueden considerarse, por ende, masas puntuales de tamaño despreciable que se mueven bajo la acción de su mutua atracción gravitatoria, describiendo cada una de ellas una elipse alrededor del centro de masas (solución al problema newtoniano de los dos cuerpos). La aproximación de masas puntuales hace innecesario incluir términos correctores que den cuenta del tamaño de las estrellas.

Cuando el tamaño de una binaria de objetos compactos es muy pequeño, hay que tener en cuenta correcciones relativistas a la solución newtoniana del problema de los dos cuerpos. Un efecto relativista a considerar es el avance del periastro (el punto de mayor aproximación entre las estrellas). Este efecto es análogo al avance del perihelio de Mercurio en nuestro sistema solar, aunque en el caso de los sistemas binarios de objetos compactos pueda ser cuantitativamente mucho mayor. Aun así, siempre que después de una revolución orbital el avance del periastro sea sólo de algunos grados, podemos admitir que cada estrella se mueve siguiendo una órbita elíptica, que cambia poco a poco la orientación de sus ejes.

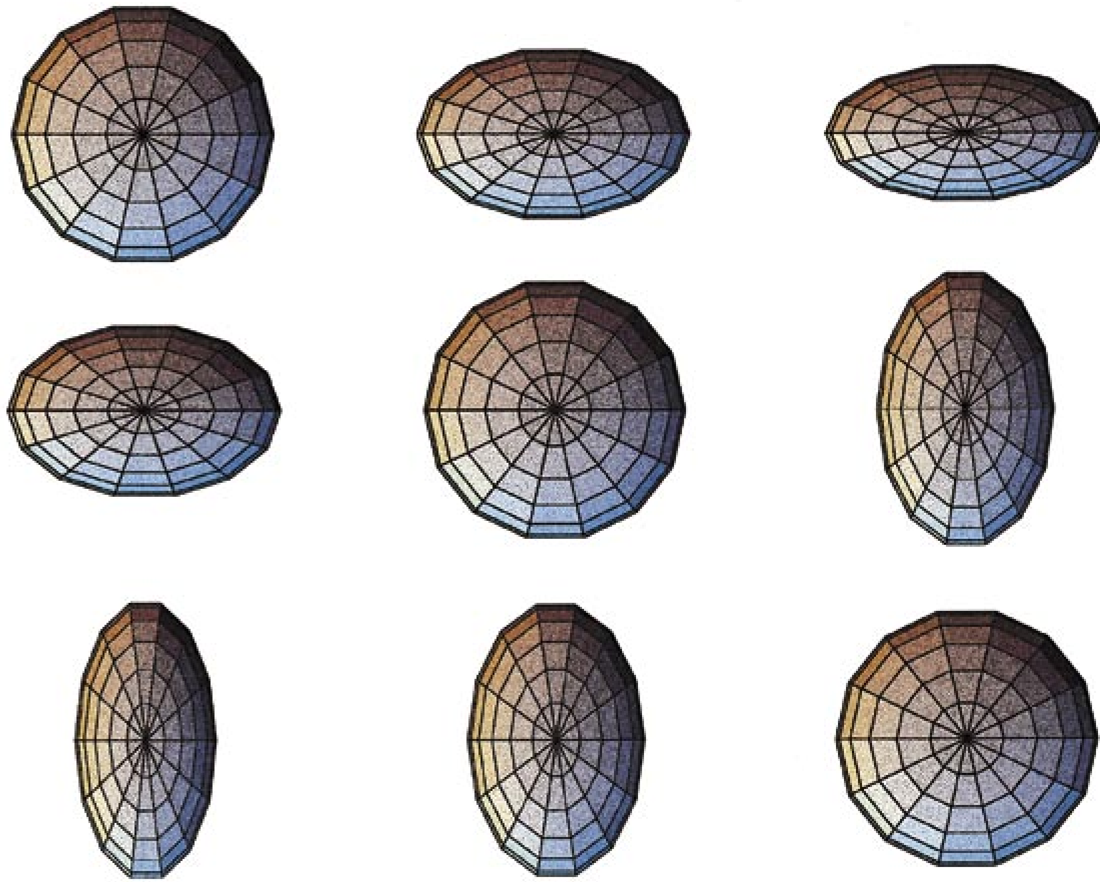
Otra corrección relativista viene impuesta por el mismo fenómeno que queremos describir: la energía y el momento angular del sistema binario disminuyen por efecto de la emisión de ondas gravitatorias. Salvo en casos muy extremos, esta pérdida es tan lenta, que se puede suponer que la órbita sigue siendo una elipse, aunque su tamaño (medido por su semieje mayor) y su excentricidad disminuyan de forma continua. La evolución de un sistema doble de objetos compactos es extremadamente lenta mientras persista una gran distancia entre las estrellas del sistema binario; aumenta su ritmo progresivamente con la disminución de la separación, hasta que al final las estrellas entran en contacto cayendo una sobre otra (coalescencia).

En el púlsar binario PS 1913+16 se ha podido comprobar la influencia,

JESUS GONZALEZ DE BUITRAGO y EVENCIO MEDIAVILLA son profesores de la Universidad de La Laguna. Su investigación se ha centrado en la aplicación de la relatividad a la astrofísica. Buitrago dirige el grupo de astrofísica teórica del Instituto de Astrofísica de Canarias, en el que está encuadrado Mediavilla.



6. RADIACION GRAVITATORIA emitida por un sistema binario coalescente. En los últimos segundos de la vida de una binaria, antes de que las estrellas entren en contacto, la emisión de radiación gravitatoria da lugar a una pérdida de energía que se traduce en una rápida disminución de la distancia entre las estrellas de la binaria. La variación del radio orbital genera un progresivo aumento de la frecuencia y de la amplitud del campo radiado que puede verse reflejado en la forma de la onda. Antes de que las dos estrellas caigan una sobre otra la emisión se hace muy intensa y su frecuencia estaría por encima de la del ruido sísmico. Es en este instante de tiempo, antes del fin de la vida del sistema binario, cuando las posibilidades de detección se hacen mayores.



7. DEFORMACION de una superficie esférica al paso de una onda gravitatoria con polarización h_+. Se muestran las variaciones entre las distancias que separan a una distribución de partículas situadas sobre la superficie de una esfera de dimensiones despreciables respecto a la longitud de onda de la radiación gravitatoria. La dirección de propagación de la onda es perpendicular a la superficie del papel. De izquierda a derecha y de arriba abajo se ve la respuesta de la esfera al paso de la onda para diferentes fases (desde 0 a 360 grados en intervalos de 45).

predicha por la teoría general de la relatividad, de los efectos descritos en la evolución de los sistemas binarios de objetos compactos. La evolución de los parámetros orbitales de este sistema binario se ha aceptado como una prueba indirecta de la existencia de radiación gravitatoria. En 1993 les fue concedido el premio Nobel de física a Hulse y Taylor por sus estudios sobre este sistema doble, auténtico laboratorio de relatividad general.

De acuerdo con el funcionamiento de los detectores de ondas gravitatorias, que son antenas que hay que sintonizar, dividiremos los sistemas binarios de objetos compactos en razón de la frecuencia. En los sistemas de baja frecuencia, las estrellas están muy separadas, la evolución es despreciable y basta la dinámica newtoniana, con la corrección relativista del avance del periastro, para describir las órbitas. Estos sistemas son los más abundantes en nuestra galaxia. En los sistemas de alta frecuencia, o coalescentes, la separación entre las estrellas es pequeña y la variación de los parámetros orbitales por efecto de la emisión gravitatoria resulta determinante en la evolución del sistema.

Para las binarias de baja frecuencia es posible obtener soluciones analíticas exactas (en la aproximación cuadrupolar) para las dos componentes independientes del campo de radiación gravitatoria. En el caso de las órbitas circulares, el campo es una función sinusoidal de frecuencia doble de la orbital (Ω) y su intensidad es inversamente proporcional a la distancia entre la binaria y el observador. La potencia radiada por la binaria depende también de la inclinación relativa del plano de la órbita respecto del observador, siendo máxima la emisión en la dirección perpendicular al plano orbital.

Las ecuaciones del campo de radiación son mucho más complejas cuando se consideran órbitas elípticas, pues los campos no dependen entonces del tiempo a través de expresiones sencillas de la frecuencia orbital (Ω). Este problema puede solventarse calculando por métodos numéricos el campo gravitatorio. Sin embargo, para una mejor comprensión de las propiedades de las ondas gravitatorias (y también para trabajar en la detección en tiempo real) es preferible un tratamiento analítico.

Con este objetivo, en colaboración con Clemente Moreno Garrido, nos propusimos obtener expresiones analíticas de los campos de radiación gravitatoria en función de los armónicos de la frecuencia orbital (Ω) siguiendo el procedimiento habitual de la mecánica celeste. Las expresiones que obtuvimos permiten estudiar la forma de la onda en función de los diferentes parámetros orbitales de la binaria.

Al ser las elipses unas curvas menos simétricas que los círculos, el campo y su espectro dependen no sólo de la inclinación relativa del

plano orbital respecto al observador, sino también de la posición de los ejes de la elipse. Para elipticidades altas, las componentes del campo de radiación gravitatoria se apartan de un comportamiento sinusoidal. Así, la potencia de la radiación gravitatoria correspondiente a sistemas con mayor elipticidad está distribuida en armónicos (nΩ) más altos de la frecuencia fundamental. Cuando el periastro avanza, la forma de la onda aparece modulada por la frecuencia de dicho progreso, generando una división de los armónicos en "dobletes" o "tripletes".

El estudio de sistemas de alta frecuencia, cuya evolución es manifiesta, encierra mayor complejidad. Si la evolución viene determinada únicamente por los efectos relativistas, pensemos en binarias de estrellas compactas, el tamaño de las órbitas y su excentricidad dependen exclusivamente del tiempo transcurrido, así como de los valores iniciales del semieje mayor y de la excentricidad. En este caso es posible determinar el campo gravitatorio en cualquier instante de la vida de la binaria. La amplitud y la frecuencia de las ondas gravitatorias emitidas aumentan a medida que transcurre el tiempo y disminuye el tamaño del sistema debido a la pérdida de energía por radiación gravitatoria. Justo antes de la coalescencia se produce una emisión muy intensa y de alta frecuencia que se espera poder detectar.

Aunque los sistemas binarios son las fuentes de ondas gravitatorias que mejor conocemos, no son las únicas. Hay otros emisores de radiación gravitatoria que son también periódicos y observables durante largos intervalos de tiempo. La emisión de los sistemas periódicos se caracteriza por una distribución espectral de potencia constante, asociada a frecuencias del orden del milihertz. Son posibles fuentes periódicas las enanas blancas y las estrellas de neutrones que giran rápidamente y presentan desviaciones de la esfericidad. A diferencia de estos mecanismos periódicos, hay otros procesos que generan ondas gravitatorias y se caracterizan por producirse durante un lapso de tiempo muy breve y estar asociados a altas frecuencias, del orden de 1 kilohertz.

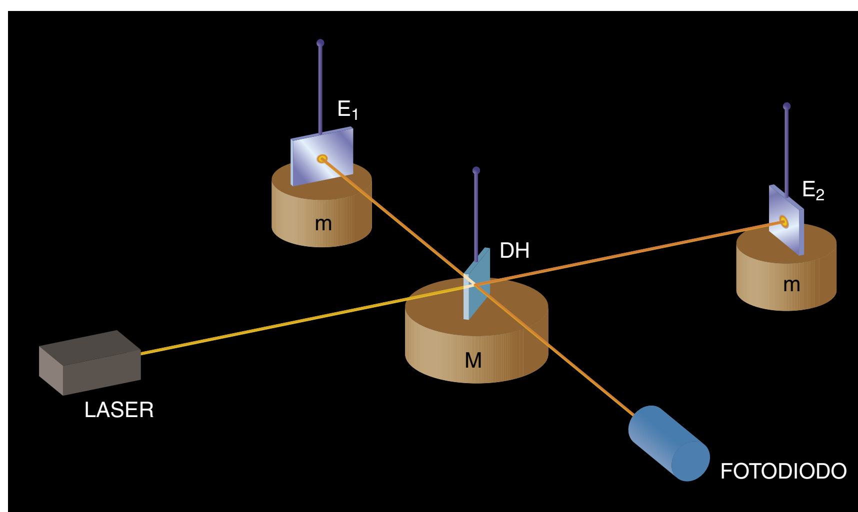
La coalescencia de binarias, el último estadio en la vida de los sistemas de binarias compactas, es uno de estos procesos "explosivos". El colapso asimétrico —recuérdese que no habría emisión de ondas gravitatorias en el caso de simetría esférica— de supernovas para generar estrellas de neutrones o agujeros negros constituye otra fuente explosiva de ondas gravitatorias. Además de las emisiones periódicas y explosivas, se supone la existencia de una radiación gravitatoria de fondo a la que contribuyen fuentes de diverso tipo distribuidas aleatoriamente en el espacio y en el tiempo. Parte de esta radiación de fondo se debe a la superposición al azar de la emisión procedente de los innumerables sistemas binarios que existen.

También se acepta que ciertos procesos a escala cosmológica, como la generación de ondas gravitatorias primordiales poco después de la creación del universo, pudieran haber contribuido al fondo estocástico de radiación gravitatoria.

Las posibilidades de detección de las ondas gravitatorias se basan, obviamente, en su interacción con la materia. Se trata de una de las cuestiones más controvertidas en torno a la naturaleza de las ondas gravitatorias. De acuerdo con la interpretación más común, la separación entre dos partículas de prueba debe cambiar al paso de una onda gravitatoria si esta separación es transversal a la dirección de incidencia de la onda. (Llamamos partículas de prueba a cuerpos con masas suficientemente pequeñas como para no perturbar en forma apreciable el propio campo gravitatorio.)

En principio, un detector de ondas gravitatorias debe ser un dispositivo capaz de medir variaciones de distancia entre dos o más partículas. Aunque este tipo de instrumento no presenta ningún problema conceptual, la extrema debilidad inherente a la radiación gravitatoria hace que las dificultades técnicas sean enormes. Fijémonos, por ejemplo, en un típico suceso generador de radiación gravitatoria, el colapso de una supernova en el cúmulo galáctico de Virgo situado a unos 15 megaparsec de distancia (del orden de 10^{20} kilómetros). Asumiendo valores característicos para el tamaño, masa y composición de la supernova, la variación producida por la onda gravitatoria en la separación entre dos partículas situadas en nuestro laboratorio aquí en la Tierra sería de tan sólo 2 partes en 10^{21}. Es decir, nuestro dispositivo necesitaría ser capaz de medir con precisión mejor que una parte en 10^{21} la distancia entre las dos partículas de prueba.

A esa tarea punto menos que inviable, hemos de agregar la imposibilidad de aislar a los detectores de los movimientos de tipo sísmico en la corteza terrestre que producirán efectos mucho más intensos que los generados por las ondas gravitatorias. Dado que la mayor parte de los movimientos sísmicos aparecen con frecuencias menores de 100 hertz, con instrumentos terrestres sólo podremos detectar fuentes que emitan ondas de mayor frecuencia. Esto implica que la radiación emitida por un sistema doble de estrellas de neutrones sólo podría ser detectada cuando la separación entre ellas fuese muy pequeña



8. INTERFEROMETRO LASER. Forma esquematizada de una antena interferométrica. Las masas *m* llevan espejos adosados donde se refleja la luz proveniente de la fuente láser. La masa *M* tiene incorporada un divisor del haz *DH* que reparte la luz entre los dos brazos del interferómetro. Todos los rayos terminan en el fotodiodo donde se origina la figura de interferencia.

El púlsar binario PSR 1913+16: un laboratorio de relatividad general

En 1974 Russell A. Hulse y Joseph H. Taylor llevaban a cabo un programa sistemático de estudio y detección de púlsares. Uno de ellos (PSR 1913+16) mostraba variaciones anómalas en su período de emisión. Hulse y Taylor se dieron cuenta de que las alteraciones del período podían deberse a su movimiento orbital alrededor de otro objeto e hicieron público su descubrimiento de un púlsar en un sistema doble. La ausencia de eclipses les llevó a concluir que la estrella compañera también había de ser un objeto compacto.

Hulse y Taylor propusieron usar la señal del púlsar como un reloj para calcular con altísima precisión los parámetros orbitales y estudiar efectos relativistas que no se pueden detectar en sistemas binarios normales. Así se pudo determinar que el sistema PSR 1913+16 está formado por dos estrellas de masas 1444 y 1386 veces la solar, que se mueven velozmente en una órbita pequeña (de 2,8 veces el radio del Sol) y bastante excéntrica ($e \simeq 0{,}6171$). A partir de las características del sistema se midieron varios efectos relativistas como el corrimiento gravitatorio hacia el rojo, el retraso de la señal del púlsar debido al movimiento orbital o el avance del periastro (el momento de máxima aproximación de las estrellas). Este último efecto es cien veces mayor que el equivalente avance del perihelio de Mercurio (una de las pruebas clásicas de la relatividad general).

El sistema binario de Hulse y Taylor debe emitir radiación gravitatoria perdiendo energía y disminuyendo progresivamente su período orbital. A partir de los parámetros del sistema es posible calcular la pérdida de energía esperada de acuerdo con la teoría general de la relatividad. En 1982, Taylor y S. Weinberg comprobaron que las predicciones teóricas se ajustaban extraordinariamente bien a las mediciones experimentales de la variación del período orbital asociada a la emisión de ondas gravitatorias. Se trata de la única prueba experimental de la existencia de radiación gravitatoria. Pero es una prueba indirecta, que no nos permite conocer si las características de las ondas coinciden con las que se infieren de la aproximación de campo débil. Tal vez, en el futuro, sea posible detectar las ondas gravitatorias procedentes de este sistema utilizando un dispositivo espacial y comprobar directamente si la forma de la onda coincide con la calculada a partir de la teoría general de la relatividad. Desde un observatorio instalado en la Tierra no podrían detectarse las ondas generadas por el sistema pues la señal, al ser de muy baja frecuencia, quedaría enmascarada por el ruido de origen sísmico.

(del orden de 100 km), unos segundos antes de la coalescencia.

Hay en fase de construcción dos tipos de detectores: barras resonantes e interferómetros. Una barra resonante es la realización práctica del sistema idealizado de dos partículas de prueba. Consiste en un cilindro de aluminio de varias toneladas de peso cuidadosamente suspendido. Al paso de una onda gravitatoria se produce un desplazamiento relativo entre los extremos de la barra proporcional a la amplitud de la onda. Este desplazamiento queda registrado por dispositivos electrónicos, muy precisos, acoplados a la barra. En alguno de los diseños más modernos de detectores resonantes la barra se sustituye por una esfera. Para eliminar ruidos de origen térmico la barra se enfría hasta temperaturas de unos pocos grados kelvin.

La respuesta de la barra al paso de la onda se ve atenuada o reforzada de acuerdo con el valor que resulte de la relación entre la frecuencia de la onda y la propia frecuencia de vibración de la barra. Este hecho, aunque ejerce un efecto positivo sobre la sensibilidad, limita la detección a una banda bastante estrecha de frecuencias. Para obviar este problema se ha propuesto un diseño alternativo: el interferómetro láser.

En este tipo de interferómetros, la distancia entre las partículas de prueba, que ahora son péndulos de gran masa con espejos acoplados en sus extremos, se mide a partir de las interferencias de un haz de luz láser. En el esquema básico las partículas de prueba se disponen formando los brazos de un interferómetro clásico o de Michelson, así llamado en honor de Albert A. Michelson, físico norteamericano de origen polaco que desarrolló su actividad a principios de siglo. Las dimensiones típicas del sistema van desde decenas a miles de metros. Al paso de la onda gravitatoria, las distancias entre los brazos varían alterando el camino óptico y produciendo cambios en la figura de difracción.

La construcción de las primeras barras resonantes data de los años sesenta. Desde entonces se han desarrollado varios sistemas cada vez más complejos y sensibles sin que hasta el momento pueda contarse con ninguna detección fiable.

Las antenas interferométricas empezaron a desarrollarse alrededor de los años ochenta. Existen ya varios prototipos en funcionamiento y están en proyecto redes de antenas que no solamente habrán de proporcionar información sobre la amplitud y polarización de la onda, sino también localizar la fuente emisora en el cielo para su posterior identificación óptica. A fin de eludir los límites impuestos en la detección por el ruido sísmico, se ha propuesto también construir interferómetros en el espacio. Para ello habría que situar en órbita solar varios satélites dotados de espejos formando un interferómetro Michelson de enormes dimensiones (del orden del millón de kilómetros). Con este sistema se podría afrontar la detección de fuentes periódicas de baja frecuencia, como el púlsar de Hulse-Taylor.

Además de someter a comprobación las predicciones de la teoría general de la relatividad, la detección de ondas gravitatorias abriría una nueva ventana para la observación del cosmos. Si con la detección de emisión en radio comenzó la radioastronomía, con la detección de ondas gravitatorias se inauguraría una nueva rama de la astrofísica: la astronomía de ondas gravitatorias.

Casi toda la información que se recibe de los objetos del universo es de naturaleza electromagnética. La radiación electromagnética se produce a escalas atómicas o moleculares inferiores en muchos órdenes de magnitud a las de los sistemas que estudia la astrofísica. Por el contrario, los sistemas elementales, los átomos que emiten ondas gravitatorias son los

objetos de mayor interés en astrofísica (binarias, estrellas de neutrones, supernovas, agujeros negros, etc.), y la radiación gravitatoria aportaría información directa sobre la dinámica y características de estos sistemas.

Por otro lado, a diferencia de lo que les sucede a las ondas electromagnéticas, la propagación de las ondas gravitatorias se ve poco afectada por la presencia de materia. La radiación electromagnética se superpone, por lo general, sin coherencia; en muchos casos se dispersa, se absorbe, se reemite o se atenúa, de tal manera que llega al observador completamente reprocesada, aportando información muy indirecta. Hay regiones del mayor interés científico, como los núcleos activos de galaxias, que están muy obscurecidas y no pueden estudiarse bien a partir de la radiación electromagnética.

Las ondas gravitatorias, sin embargo, pueden darnos información directa sobre los fenómenos relativistas que se desarrollen en las zonas más inaccesibles. Téngase en cuenta que, por ejemplo, durante el colapso de una supernova, los mismos "intangibles" neutrinos sufren miles de choques en su viaje a través del núcleo, mientras que la radiación gravitatoria emitida podría suministrar información directa del proceso global de colapso.

En cualquier caso, quizá lo más interesante que pueda aportarnos la astronomía de ondas gravitatorias sea lo que está aún por descubrir, lo desconocido. Recuérdese que la radiación de 3 grados kelvin o los púlsares fueron hallazgos inesperados de la radioastronomía. En el futuro, esta naciente ciencia observacional podría aportar nuevos e imprevistos descubrimientos sobre los objetos del cosmos y acerca del mismo universo.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

GRAVITATION. C. Misner, K. Thorne y J. Wheeler, Freeman and Co. San Francisco, 1973.

LA RADIACIÓN GRAVITATORIA. A. Lobo, en *Revista Española de Física*, n.º 8, págs. 1 y 2, 1994.

GRAVITATIONAL RADIATION FROM POINT MASSES IN ELLIPTICAL ORBITS: SPECTRAL ANALYSIS AND ORBITAL PARAMETERS. C. Moreno Garrido, E. Mediavilla y J. Buitrago en *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, n.º 274, p. 115-126, 1995.

Los sonidos de la arena

Conocido desde hace siglos, el sonido del arenal sigue siendo uno de los fenómenos más desconcertantes de la naturaleza

Franco Nori, Paul Sholtz y Michael Bretz

Durante milenios, los nómadas del desierto han oído voces y sonidos misteriosos provocados, a su decir, por fantasmas y demonios. Marco Polo creía que a veces los espíritus malignos "llenaban el aire con sones de instrumentos musicales de todo tipo, redobles de tambor y chasquidos de espadas". La explicación que damos ahora a ese fenómeno es menos esotérica. Los sonidos son emisiones producidas por los desplazamiantos de las arenas.

Se han localizado al menos 30 dunas "retumbantes" en los desiertos y playas de Africa, Asia, Norteamérica y algún sitio más. Quienes las han oído asocian los sonidos que producen con campanas, trompetas, órganos, sirenas, cañonazos, truenos, ronroneo de un avión de hélice en vuelo a baja altura, zumbido de los cables de telégrafo, gemidos y murmullos. Pese a ello, los investigadores no aciertan a ponerse de acuerdo en cómo y por qué, bajo determinadas condiciones, la arena canta.

¿Depende del tamaño y la forma de los granos componentes? ¿De la interacción entre los granos? Sin duda, intervienen el tamaño, la forma y la mutua interacción. Pero no se han acometido suficientes análisis sistemáticos del fenómeno, ni tampoco basta un solo escenario para esclarecer el mecanismo subyacente. Aunque carecemos de una respuesta tajante, esperamos acotar las preguntas que nos lleven a una explicación verosímil.

FRANCO NORI, PAUL SHOLTZ y MICHAEL BRETZ han trabajado juntos en el estudio sobre la arena retumbante en la Universidad de Michigan en Ann Arbor. Nori da allí clases de física, igual que Bretz. Sholtz investiga en el desarrollo de programas informáticos.

Los sonidos que emite la arena no son siempre espectaculares. A nuestro paso, la arena de la playa cruje. Este tipo de arena, llamado "crujiente" o "silbante", se encuentra en playas, lagos, orillas y riberas fluviales de todo el mundo. Menos corriente es la arena "retumbante", que asombró a Marco Polo, intrigó a Charles Darwin y desconcertó a muchos más. El "retumbo" se oye casi exclusivamente en grandes dunas, aisladas en pleno desierto o en "playas traseras", lejos del agua.

Quienes han percibido los sonidos de la arena retumbante los comparan con los de instrumentos musicales. Unas veces, los estrépitos se suceden en golpes regulares, a la manera de un tambor. Otras, los sonidos recuerdan el tañer de campanas, trompetas o instrumentos de cuerda. Semejantes reverberaciones, de notable claridad, suceden con el desplazamiento de pequeñas cantidades de arena en respuesta a alguna fuerza, produciendo sólo una frecuencia de vibración cada vez. En 1994, observamos que las avalanchas someras inducidas en la Montaña de Arena de Nevada creaban sonidos similares a los del didgeridoo, instrumento de los aborígenes australianos caracterizado por una baja y monótona cadencia.

La arena crujiente produce sonidos de frecuencias muy altas, entre 500 y 2500 hertz, y duración inferior a un cuarto de segundo. Los repiques, de finísima pureza musical, presentan a menudo cuatro o cinco armónicos. En cambio, la arena retumbante crea sonidos sordos, de baja frecuencia (entre 50 y 300 hertz) y que duran como mucho 15 minutos en las dunas mayores (lo normal son sólo segundos); muy ruidosa, genera multitud de frecuencias cercanas entre sí y nunca se han observado resonancias que contengan más de un armónico del tono fundamental.

Ante discrepancias tan manifiestas, todos admiten que los mecanismos por los que uno y otro tipo de arena generan sonidos son radicalmente distintos. Con todo, a finales de los años setenta, Peter K. Haff provocó en el Instituto de Tecnología de California "crujidos" en arena "retumbante", lo que permitía sospechar alguna vinculación entre los dos tipos en cuestión.

Ambas arenas tienen que desplazarse para provocar los ruidos. Al andar, por ejemplo, hundimos y desplazamos la arena que está bajo la planta, provocando el crujido. En el caso de la arena retumbante, el desplazamiento ocurre durante las avalanchas. El sonido empieza en la avalancha y es en ella donde se encierran las respuestas.

Antes de que se desencadene una avalancha, los vientos han de construir una duna con cierto ángulo de pendiente; en el arenal de un desierto, bastan unos 35 grados. Una vez alcanzado el ángulo, la arena a sotavento de la duna inicia el desplome. Capas enteras de arena se deslizan sobre otras inferiores, como en un mazo de naipes. Al propio tiempo, los granos de las capas superiores caen sobre los inferiores y, transitoriamente, en los intersticios entre ellos, para rebotar y seguir su camino de descenso. Se cree que la fuente del sonido secreta consiste en ese movimiento vertical de vaivén. Las avalanchas en las que las placas de arena deslizadas se mantienen intactas un tiempo más largo que el que dura su movimiento, dan lugar a los mayores resultados acústicos. En ocasiones, allí donde el proceso comprende grandes cantidades de arena el estruendo puede oírse a 10 kilómetros de distancia.



1. DUNAS DEL NAMIB en Africa meridional. Producen unos estruendos sordos durante las avalanchas, que se oyen a kilómetros de distancia.

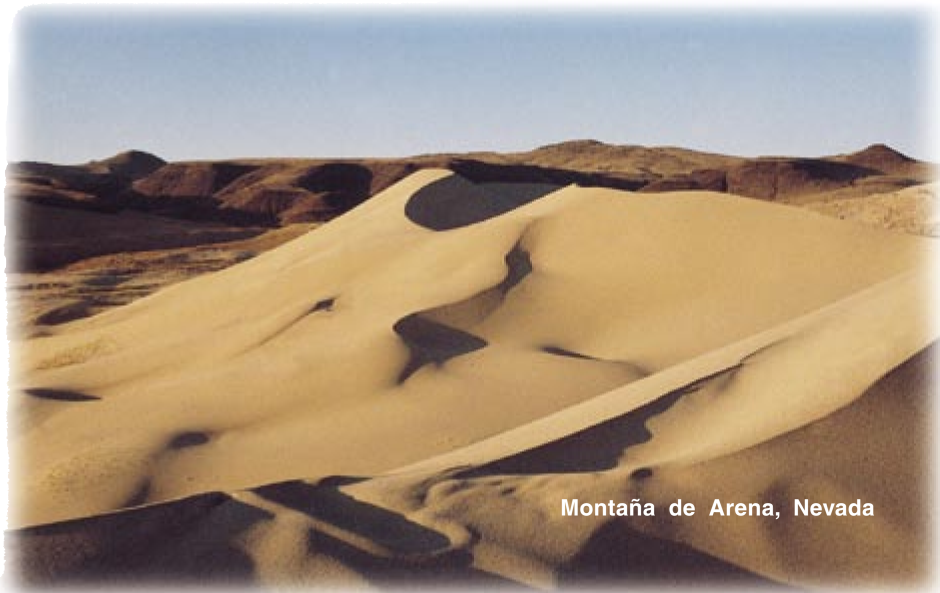
Son muchos los interrogantes que se plantean a propósito de las vibraciones. De entrada, falta mucho por conocer sobre las frecuencias de la arena retumbante. En los setenta, el grupo encabezado por David R. Criswell, de la Universidad de Houston, llegó a la conclusión según la cual cada frecuencia muestra su propio tiempo de apogeo y desplome. Tomadas en conjunto, estas frecuencias independientes cubren un intervalo cuya amplitud viene determinada por varios factores. Por ejemplo, la Montaña de Arena retumba a una frecuencia aproximada de entre 50 y 80 hertz; entre 50 y 100 hertz, los arenales de Korizo, y en el desierto del Kalahari las frecuencias abarcan desde los 130 hasta los 300 hertz. El resultado —presumiblemente causado por diversos tipos de vibración en las placas de arena deslizantes— no suele ser una melodía armoniosa, sino un ruido estridente.

Los grandes volúmenes de arena desplazada provocan un rugido sordo. Y tan penetrante e intenso, que las vibraciones que causan ese retumbo del arenal hacen imposible permanecer en el lugar.

Un buen punto a partir del cual iniciar el examen de las propiedades de las vibraciones de la arena son los propios granos, cuyo diámetro medio, sean o no activos acústicamente, está en torno a unos 300 micrometros. Los granos de una duna retumbante acostumbran alcanzar tamaños similares, en especial cerca de la cresta, a sotavento, donde se origina la mayoría de las veces el sonido. Esta uniformidad permite un deslizamiento más eficiente; con granos menores se impediría el movimiento regular de los mayores.

La sola existencia de granos de tamaños similares no asegura que la arena resuene. Al contrario, las arenas retumbantes de Korizo y Gelf Kebib presentan un amplio e insólito abanico de partículas de distintos tamaños. Más aún, una duna silenciosa suele contener granos de tamaños parecidos a los de cualquier duna retumbante próxima.

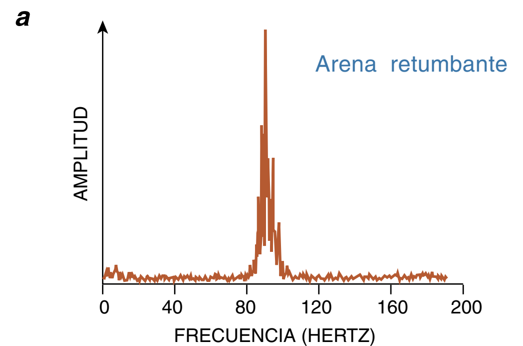
Los granos de la arena retumbante se distinguen por su superficie alisada, con salientes apenas micromé-

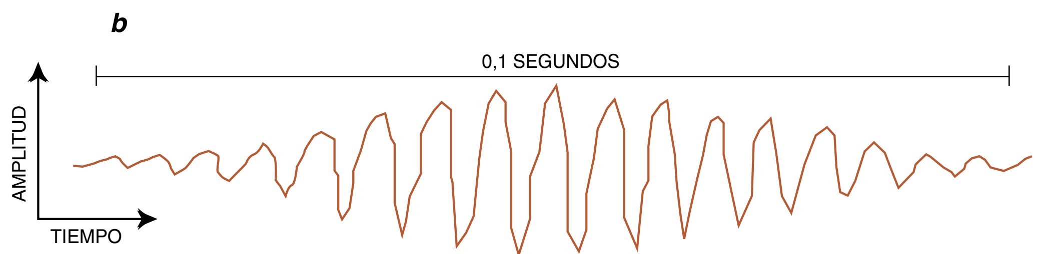






2. LA ARENA RETUMBANTE (*puntos rojos*) se encuentra en todo el planeta. En el mapa y en las fotografías aparecen algunas localizaciones. El sonido producido por la arena retumbante abarca frecuen-





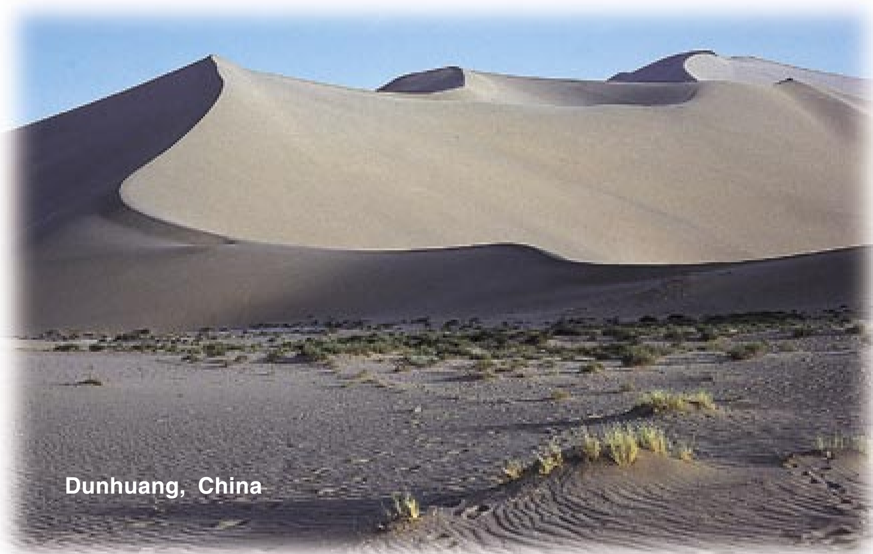
tricos. Las dunas retumbantes suelen localizarse, siguiendo la dirección del viento, al final de las grandes acumulaciones de arena. Tras rebotar y rodar por el desierto, los granos de arena de estas dunas acaban pulidos. También la arena crujiente tiene los granos alisados.

No obstante, un análisis más fino de la Montaña de Arena y la arena retumbante del desierto del Kalahari nos revela que no todos los granos muestran una morfología esférica o siquiera redondeada. En 1936, A. D. Lewis, de Pretoria, afirmó haber provocado un retumbo, incluso, con los granos cúbicos de la sal común. Estos hallazgos muestran que, si bien, la suavidad de la superficie y la redondez del grano son esenciales para producir sonido, también lo es cierto grado de rugosidad; al contrario de lo esperado tras un análisis superficial, se demostró también que un montón de cuentas de cristal perfectamente esféricas no retumbaban.

La humedad constituye otro factor a considerar. Puede ella modificar la fricción entre los granos o causar su amontonamiento, impidiendo por tanto el desplazamiento. Los sonidos se producen en las partes de la duna que se secan antes. Aunque en el desierto la precipitación sea muy escasa, las dunas retienen el agua con notable eficiencia. De todas formas, la arena próxima a la superficie se seca en seguida y todavía más la que se encuentra en la cresta de la duna.

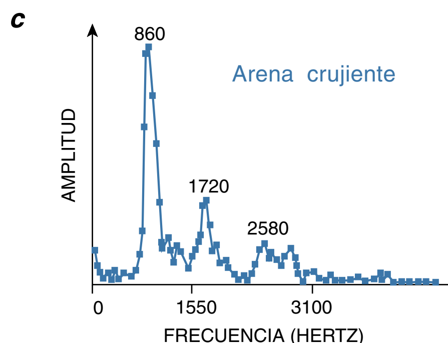
Cerca de la cima, a sotavento, la combinación de superficie pulida de los granos, tamaño adecuado de las partículas y falta de humedad, establece las condiciones adecuadas para que se produzca sonido durante el desplome. Teniendo en cuenta que el viento deposita más arena cerca de

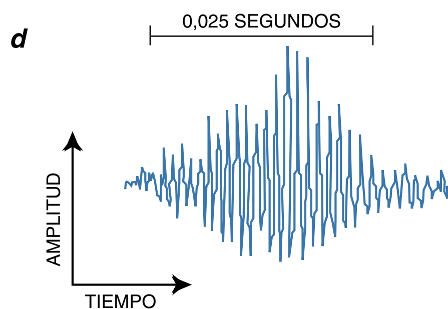






cias muy próximas entre sí (*a*), fuertes golpes y larga duración (*b*). El sonido de la arena crujiente contiene armónicos de una nota fundamental (*c*), aunque de forma muy breve (*d*).





lo alto de la vertiente de sotavento, la arena se acumula allí antes que en las zonas más bajas de la duna, por lo que la inclinación se incrementa lentamente hacia donde se producen las avalanchas.

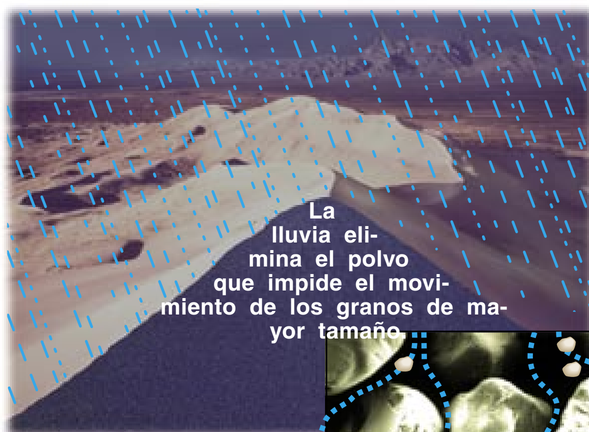
Las grandes capas de arena se parten cerca de la cresta. Estas lajas, en la arena retumbante, no suelen descender lentamente en amplios flujos hasta encontrar pendientes más suaves sino que, o bien las partes más elevadas se caen enteras, o bien se incrustan violentamente en las partes inferiores. La fractura eventual de una placa es insólitamente turbulenta.

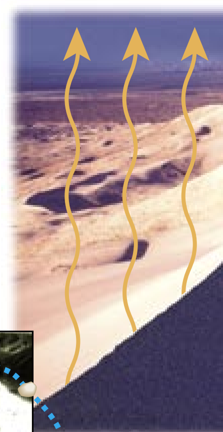
No resulta fácil avanzar en el conocimiento de los sonidos generados por la arena. La rareza del fenómeno y la dificultad para reproducir los sonidos en el laboratorio frenan cualquier progreso en la investigación, en particular si se trata de la arena retumbante. Y tampoco podemos fiarnos de trabajos precedentes que no distinguían entre la arena crujiente y la retumbante.

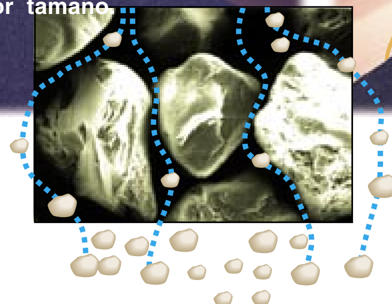
En 1889, apareció uno de los primeros estudios, firmado por H. Carrington Bolton. Atribuía los sonidos a la precipitación, sobre los granos de arena, de finas capas de impurezas debido a la gradual evaporación del agua. La vibración de los colchones de aire situados entre las placas desprendidas provocaría emisiones acústicas que se verían modificadas por la estructura de la superficie de los mismos granos. Bolton se centró en la arena crujiente, aunque adoptó el mismo modelo para explicar el fenómeno de las arenas retumbantes.

Por las mismas fechas, Cecil Carus-Wilson sugirió que los sonidos de la arena crujiente se producían como resultado de los efectos de la fricción sobre los granos individuales. Llegó a la acertada conclusión de que los granos de la arena sonora son, por lo común, esféricos, redondeados y “bien distribuidos”, término utilizado para definir una alta concentración de granos del mismo tamaño. Posteriormente, Criswell y sus colaboradores cuantificaron los resultados.









3. EL RETUMBO de la arena ocurre una vez se han creado las condiciones óptimas: granos limpios de polvo, secos, de superficie pulida y redondeados situados en la cima de una duna. Luego, si la pendiente de la duna es superior al ángulo crítico de 34 grados, se produce una avalancha. Las capas de arena superiores se mueven más deprisa que las subyacentes (*a*), elevándose y depositándose repetidamente entre los granos (*b-d*). Se cree que el movimiento coordinado de ascenso y descenso es el causante del retumbo.

En 1966, R. A. Bagnold, publicó en *Proceedings of the Royal Society* un estudio que relacionaba el comportamiento de la arena con la sonoridad. Bagnold, en el primer intento exhaustivo de analizar este fenómeno, sostuvo que tanto los sonidos de la arena crujiente como los de la retumbante eran producto del mismo proceso. Su argumentación se basa en el concepto de "dilatación", parámetro que mensura el espacio vacío entre granos. Conforme una capa se desliza sobre otra, tiende a subir y bajar periódicamente a medida que los granos que caen se alojan en los intersticios entre granos subyacentes. La frecuencia del sonido producido por esta vibración colectiva varía como la inversa de la raíz cuadrada del tamaño medio de los granos.

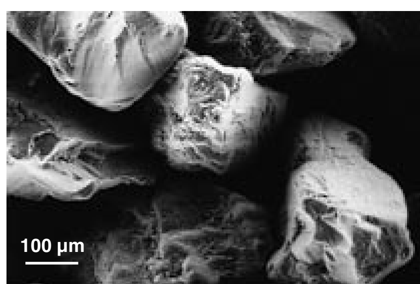
Aunque elegante, este mecanismo no acaba de explicar el retumbo. No justifica la creación simultánea de cuatro o cinco tipos de vibraciones por el mismo bloque de granos. Tampoco da razón de la baja frecuencia de los golpes que acompañan a los flujos prolongados.

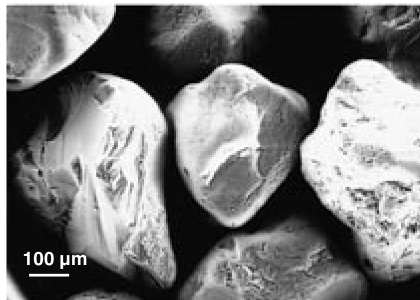
Los argumentos de Bagnold adquieren mayor fuerza en el caso de la arena crujiente. El pisar la arena produce su desplazamiento en planos, a la manera de los planos que se forman durante las avalanchas. Sólo divergen en la fuerza aplicada. Mientras el peso de la arena desencadena la avalancha y el estruendo, la tensión de compresión de una pisada insta el desplazamiento que provoca los crujidos. Las frecuencias que presenta la arena crujiente encajan mejor en el modelo de Bagnold que las causadas por retumbos.

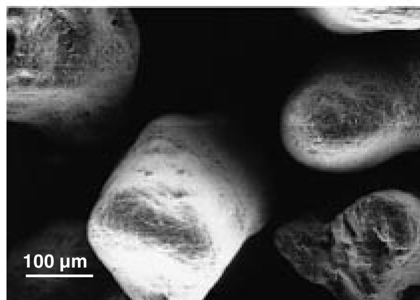
Nos hemos visto incapaces de producir crujidos en la arena retumbante, por más que en 1889 se sugiriese ya que un mismo tipo de arena podía generar ambos tipos de sonido. Bolton escribió que la arena de Hawai "posee las propiedades acústicas" de playa y desierto, emite los mismos sonidos durante las avalanchas que la de Jebel Nagous, una duna retumbante de Egipto, y lanza "un silbido peculiar cuando se vierte en una bolsa, como la arena de Eigg (Escocia); Manchester, Massachusetts; y otras playas marinas".

En los años setenta, Haff indujo, de nuevo, crujidos de alta frecuencia utilizando arena retumbante, en este caso, de las dunas californianas de Kelso. Este descubrimiento apoya la teoría de Bagnold según la cual la única diferencia entre la arena retumbante y la crujiente estriba en el mecanismo por el que se producen: compresión en un caso, avalancha en otro.

Existen, sin embargo, diferencias entre la arena que retumba y puede ser forzada a crujir en el laboratorio y la arena que cruje en su lugar natural. El análisis de Haff muestra



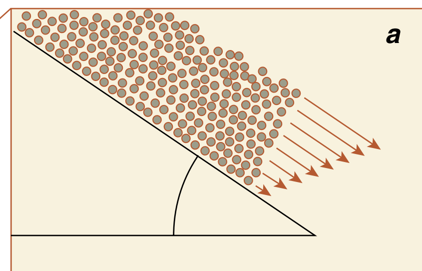


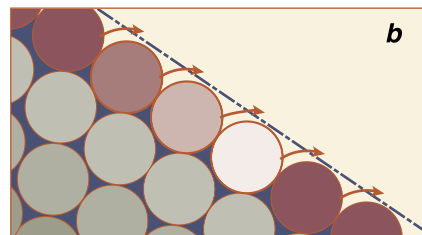


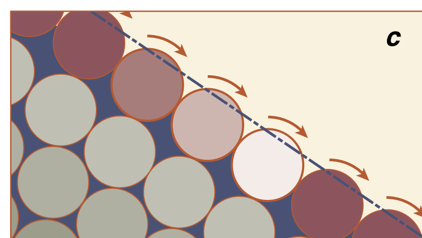
4. MICROGRAFIAS electrónicas de diversas arenas. La micrografía superior muestra granos normales procedentes de las riberas del lago Hurón. Se aprecian sus bordes irregulares. La arena crujiente de la micrografía central, de granos más lisos, pertenece al lago Michigan. Más repulida todavía es la arena retumbante extraída de las dunas de la Montaña de Arena (*abajo*).

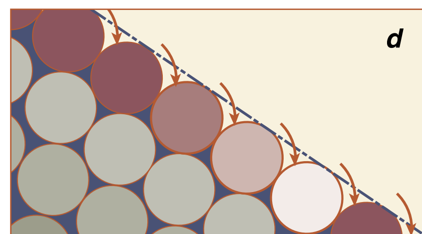












que en la arena retumbante, durante las emisiones de crujidos, aparecen múltiples frecuencias, mientras que las notas más limpias se dan en la auténtica arena crujiente.

Para que la arena retumbe deben cumplirse ciertas condiciones. En primer lugar, la duna tiene que hallarse lejos de la fuente original de arena; se trata de que el viento transporte los granos a lo largo de grandes distancias y deposite en la cima de la duna, o cerca de ella, granos homogéneos y redondeados. En segundo lugar, tiene que producirse una precipitación abundante que permita el lavado del polvo y de las partículas que se encuentran entre los granos, seguida de una o dos semanas de sequía. Por último, ha de soplar un viento que acarree arena hasta la cima de la duna y desencadene una avalancha.

La resistencia de la arena a desprenderse aparece como el parámetro fundamental que determina su capacidad de retumbar. Por un lado, mientras la arena compactada no se desgaja, la de granos ligeramente agrupados tiende a comportarse como un fluido y no se separa del modo adecuado para provocar la resonancia. Sabemos ya que todos esos factores condicionan los sonidos emitidos. Ignoramos en cambio todavía cómo se interrelacionan para engendrarlos.

Un buen lugar para empezar a ahondar podría ser Hawai. Las dunas traseras de las islas de Kauai y Niihau son los únicos ejemplos de arena retumbante fuera de los desiertos. Son dunas más húmedas que las del desierto, con un grano enorme, de unos 460 micrometros de diámetro. Su arena difiere de cualquier otra sonora: la componen granos de carbonato cálcico formado de conchas marinas. Según se cree, son las únicas retumbantes que no están compuestas de cuarzo. Puesto que los casos excepcionales arrojan luz sobre los normales, el estudio de esos arenales podría resultar provechoso.

El retumbo y el crujido se pueden reproducir en bolsas o cubos. Mas, para ilustrar el mecanismo emisor de sonido, se requiere una estricta aproximación al proceso de desprendimiento de la arena. Podríamos valernos con tal fin de refinados equipos de radiología, aunque por ahora no ha concluido ningún análisis de este tipo.

Otra interesante línea de investigación es el comportamiento eléctrico de la arena. Cuando se comprime un grano de sílice, éste tiende a desarrollar cargas eléctricas opuestas en cada extremo. La diferencia de cargas provoca la atracción entre granos. En el desierto de Kalahari, en 1936, Lewis observó durante una lenta avalancha de arena retumbante que los granos se adherían unos a otros para formar filamentos de unos 13 milímetros. Mediante un electroscopio se comprobó que esos cordones estaban cargados eléctricamente. Pese a ello, nosotros creemos que la carga eléctrica de la arena no incide en la emisión acústica. Y aunque los efectos eléctricos podrían ayudar a explicar por qué la humedad evita el retumbo, nadie ha aportado nada serio sobre el particular.

Otras prometedoras vías de investigación incluyen el análisis sistemático de la composición mineral de la arena retumbante para estudiar la importancia de su potencia de desplazamiento. Por otro lado, la creación de arena retumbante sintética puede resultar útil al permitir la manipulación y evaluación de distintos parámetros. A pesar de todo, quizás, el mayor atractivo de las melodías de la arena es que continúa siendo un rompecabezas sin resolver.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE PHYSICS OF BLOWN SAND AND DESERT DUNES. R. A. Bagnold. Methuen, Londres, 1954.

SOUND-PRODUCING DUNE AND BEACH SAND. J. F. Lindsay, D. R. Criswell, T. L. Criswell y R. S. Criswell en *Geological Society of America Bulletin*, vol. 87, páginas 463-473; 1976.

SOUND-PRODUCING SAND AVALANCHES. Paul Sholtz, Michael Bretz y Franco Nori en la World Wide Web a la que se accede en http://www-personal.engin.umich.edu/~nori/booming_sand.html.

Creación artificial de poros en las células

Con la técnica del ADN recombinante podemos forjar poros artificiales en las membranas celulares al objeto de introducir fármacos o instalar biosensores para descubrir sustancias tóxicas

Hagan Bayley

La membrana externa de la célula no se limita a enclaustrar su contenido variopinto. Actúa, y de manera muy eficaz, como guardián exigente de cuanto entra y sale. Franquea el paso a los nutrientes y otros compuestos necesarios; las moléculas que no se precisan, permanecen en el exterior. Da salida de la célula a los productos de desecho. Pero en la lucha sin tregua entre las especies, las bacterias patógenas han adquirido la capacidad de infiltrarse en las defensas celulares y desbaratar el equilibrio de entradas y salidas.

Las armas utilizadas en esa batalla son ciertas proteínas liberadas por el patógeno para taladrar la membrana celular y provocar la entrada en tromba de materiales extraños hacia el interior de la célula y la salida de algunos de sus integrantes. El hombre se protege de muchos de estos ataques con un artillería similar: el sistema inmunitario aprovecha las propiedades de sus proteínas formadoras de poros para destruir células foráneas.

En mi laboratorio investigamos los mecanismos fundamentales del comportamiento de estas proteínas y buscamos, además, posibles aplicaciones en biotecnología y medicina. Vamos tras la idea de instalar porteros moleculares con unas hechuras cortadas a propósito, pensando en bombardear células cancerosas con proteínas que alteren sus membranas externas y, de ese modo, hacerlas más sensibles a la quimioterapia. Podrían incluso crearse membranas sintéticas con poros artificiales incrustados que actuaran como biosensores o facilitasen la administración de fármacos.

HAGAN BAYLEY es profesor y director del departamento de bioquímica y genética médica de la Universidad Texas A&M.

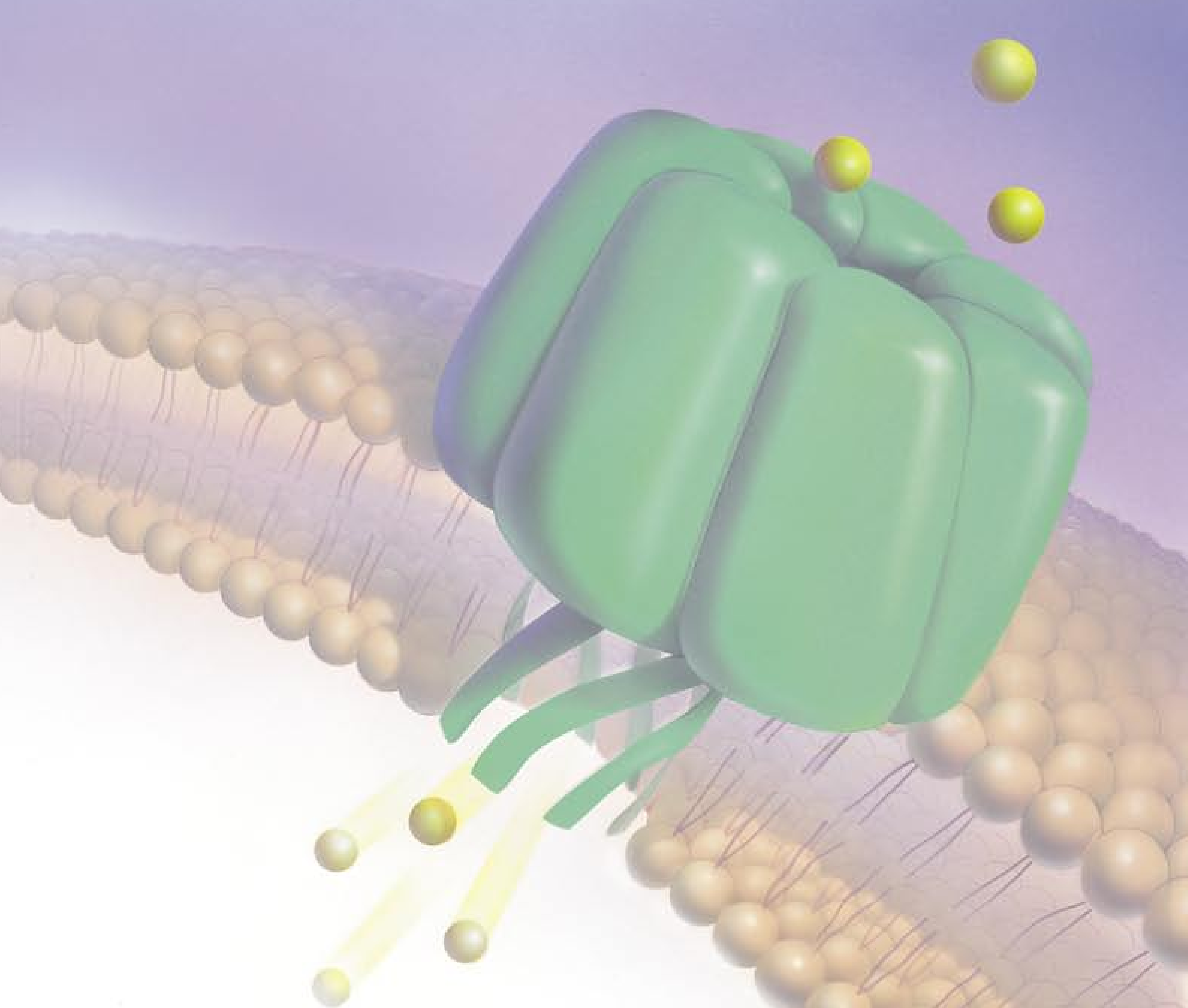
Las proteínas bacterianas formadoras de poros presentan múltiples propiedades. La alfa-hemolisina, en la que me centraré, es una proteína segregada por la bacteria *Staphylococcus aureus*, causante de infecciones estafilocócicas. La proteína asalta sus células diana mediante la formación de poros de un diámetro aproximado de dos nanómetros, abertura suficiente para el tránsito de la sacarosa, pero demasiado angosta para moléculas mayores, proteínas incluidas. Por contra, la estreptolisina-O de la bacteria *Streptococcus* forma poros de más de 30 nanómetros de diámetro. Lo mismo que la alfa-hemolisina, la proteína estreptolisina-O produce la lesión, si no la muerte, de la célula a consecuencia de tales perforaciones.

La proteína de la capa S proporciona a la bacteria una envoltura protectora; forma hojas planas con numerosas aberturas de un tamaño más o menos homogéneo, entre dos y seis nanómetros de diámetro, según el tipo de bacteria. Los poros de estas hojas permiten el paso de determinados nutrientes hacia el interior de la célula.

Diversas razones nos han movido a escoger la alfa-hemolisina. Los cultivos bacterianos producen la proteína en abundancia (hasta unos cuantos gramos si es necesario). Alcanza un tamaño bastante pequeño, de sólo 293 aminoácidos presentes en su estructura, lo que facilita su manipulación y alteración mediante la técnica del ADN recombinante. Además, comparada con otras proteínas, se trata de una molécula que es muy estable. En 1984 Gary S. Gray, a la sazón en Biogen, y Michael Kehoe, en la Universidad de Ginebra por entonces, identificaron la estructura del gen que codifica la proteína. Hace ahora un año, J. Eric Gouaux determinó con su equipo la estructura tridimensional del poro de la alfa-hemolisina: constituye un complejo fungiforme integrado por siete moléculas de alfa-hemolisina.

Las investigaciones del grupo que encabeza Sucharit Bhakdi en la Universidad de Maguncia sugieren una doble vía de asociación de la alfa-hemolisina para formar el poro. Determinadas células, así los hematíes del conejo, poseen en su superficie receptores especiales que traban la alfa-hemolisina; estos receptores pueden instar la formación del poro o contribuir a la orientación correcta de la estructura de la hemolisina sobre la membrana celular. Pero incluso en ausencia de este tipo de receptores las moléculas de alfa-hemolisina pueden realizar su función. Sobre membranas artificiales (constituidas por una doble capa de lípidos), las proteínas se organizan por sí solas en poros. Las proteínas también se ensamblan espontáneamente cuando se mezclan con ciertos compuestos relacionados con los detergentes habituales. El autoensamblaje ofreces ventajas reales a los biotecnólogos que buscan la síntesis de moléculas basándose en la estructura de la alfa-

1. INCRUSTACION de un poro artificial en una membrana. Puede ser ésta la de una célula o una membrana artificial constituida por una bicapa lipídica. Los canales en cuestión, constituidos por versiones modificadas de la proteína bacteriana alfa-hemolisina, pueden conformarse y adaptarse para controlar el tráfico de fármacos.



hemolisina, porque ya el proceso de producción se encargará de resolver otros problemas.

Trabajos recientes sobre la alfa-hemolisina realizados en mi laboratorio y en los de Bhakdi y Gouaux han contribuido a esclarecer diversos aspectos del proceso de formación del poro. Una vez que las moléculas de alfa-hemolisina se unen a la membrana celular o una membrana lipídica artificial, se congregan en grupos de siete y crean un complejo preporo. El centro de cada monómero consta de una larga ristra de 40 aminoácidos. Esta hilera penetra en la membrana celular y allí forma parte del revestimiento del canal.

Mi objetivo inicial se ceñía al empleo de técnicas de ingeniería de proteínas para manipular tres propiedades esenciales del poro de la alfa-hemolisina: el tamaño de la abertura, la selectividad del canal en el tráfico de moléculas y la capacidad del poro para abrirse y cerrarse.

En circunstancias normales, el poro de la alfa-hemolisina permanece abierto. Se advierte que presenta una ligera preferencia, no excesiva, por franquear el paso de moléculas dotadas de carga negativa sobre las moléculas neutras o dotadas de carga positiva. Para el propósito de mi trabajo, la abertura resultaba la deseada; otro canal que fuera mayor o menor costaría mucho remodelarlo. Entendí, pues, que el poro de alfa-hemolisina constituía un excelente punto de partida para ensayar modificaciones mediante ingeniería de proteínas.

Cuando inicié esa línea de trabajo, no sabía bien cómo abrir y cerrar el canal. Sin duda, la tarea más difícil de los tres objetivos propuestos. Con el tiempo, logramos en mi laboratorio colocar gatillos e interruptores moleculares en la proteína que hacen que el poro se abra o se cierre a voluntad. Nos hemos centrado en este aspecto de la investigación porque encierra notables implicaciones prácticas.

Con técnicas de ingeniería de proteínas sustituimos aminoácidos de una proteína por otros aminoácidos naturales o incluso no naturales sintetizados en mi laboratorio. Gracias a ello podemos colocar gatillos e interruptores

potenciales en la alfa-hemolisina y explorar cuáles actúan.

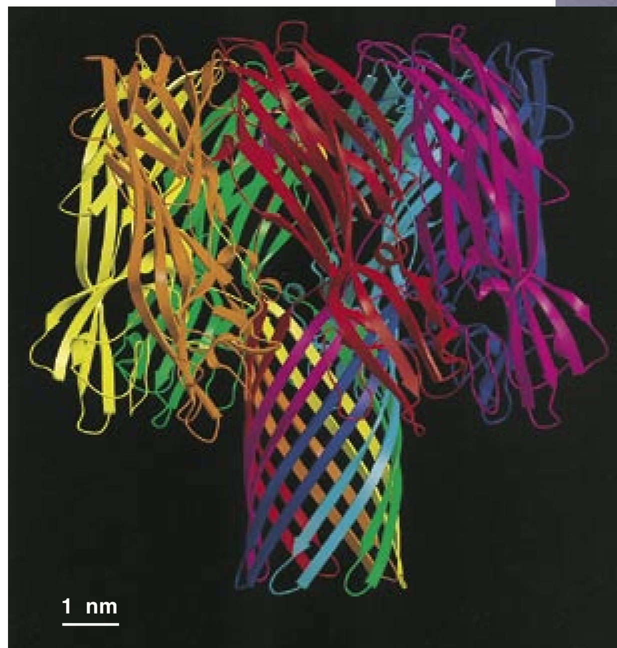
En principio, los interruptores moleculares pueden ser bioquímicos (activados por enzimas) o químicos (activados al enlazarse moléculas pequeñas a la proteína). La activación por un estímulo físico, como el calor o la luz, es otra posibilidad. Los tres enfoques sirven en el caso de la alfa-hemolisina.

Con la ayuda de Barbara J. Walker, de la Fundación Worcester de Biología Experimental en Shrewsbury, donde comencé mi investigación, introduje un gatillo bioquímico en la alfa-hemolisina, añadiendo una pequña cadena polipeptídica —de 11 a 53 aminoácidos— a la cadena central de la proteína que habitualmente se abre paso a través de la membrana. Este segmento adicional bloquea la apertura del poro; el tratamiento ulterior de la proteína con una proteasa corta esta pieza adicional, permitiendo que prosiga la formación del poro.

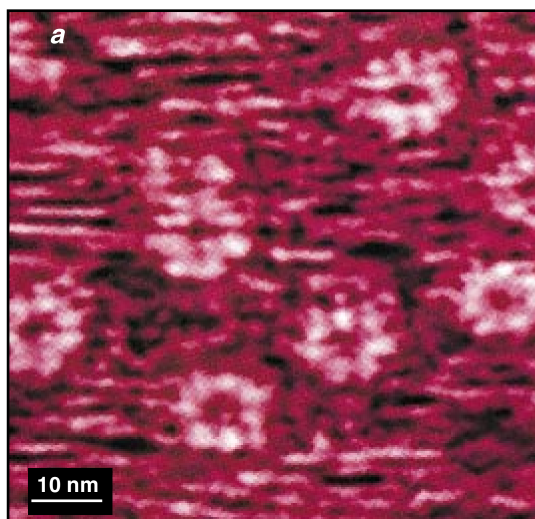
Podrían emplearse gatillos bioquímicos para preparar alfa-hemolisinas que penetraran sólo en células seleccionadas. Por ejemplo, hemolisinas arregladas de suerte tal que se encaminaran a un tumor con la ayuda de fragmentos de anticuerpo (elegidos para reconocer células cancerosas) incorporados en la estructura de la proteína mediante ingeniería genética. Cuando estas proteínas híbridas alcanzaran las células cancerosas, entonces las proteasas liberadas por las mismas células cancerosas podrían instar la formación de poros. (Las células cancerosas metastásicas segregan proteasas que facilitan a las células cancerosas su huida del tumor primario y asentarse en nuevos lugares.) Las hemolisinas transformadas comenzarían a horadar las células cancerosas, aumentando su permeabilidad y mostrarse con ello asequibles a fármacos citotóxicos. En esa línea de trabajo, Rekha G. Panchal consiguió, en mi laboratorio, alfa-hemolisinas mutantes que se activan por proteasas tumorales.

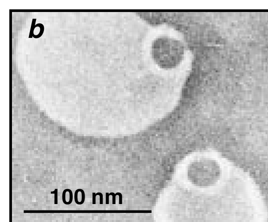
Con el tiempo, podría conseguirse la inserción de un interruptor bioquímico mediante el cual se abriese o cerrase la actividad formadora de poros, en lugar de que sucediera sólo lo primero. Dan W. Urry, de la Universidad de Alabama en Birmingham, ha logrado no ya modificar la forma de una proteína sintética, sino devolverla después a la configuración original; para ello se ha servido de enzimas y ha sacado partido de una reacción de fosforilación. Nosotros hemos comenzado a adaptar los métodos de Urry para crear interruptores bioquímicos que nos permitan abrir y cerrar el poro de alfa-hemolisina cuantas veces sea preciso.

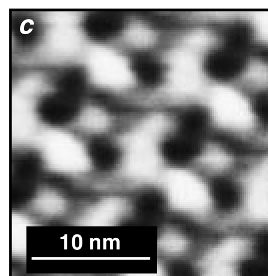
Hemos introducido un segundo tipo de gatillo en la estructura de la alfa-hemolisina. Se activa con moléculas muy reactivas pequeñas. Esta técnica podría adaptarse a la producción de membranas artificiales de empleo potencial en biosensores que detecten moléculas tóxicas, incluidos plaguicidas y gases neurotóxicos. En mi laboratorio se ha preparado una versión mutante de la alfa-hemolisina insertada en la superficie de un liposoma (una esférula microscópica constituida por una membrana formada por una bicapa lipídica) que se reorganiza para dar lugar a un poro, cuando un compuesto orgánico muy reactivo se une permanentemente a una región de la estructura obtenida por ingeniería genética. La apertura del canal puede detectarse por la salida de un compuesto fluorescente que se ha colocado en el interior



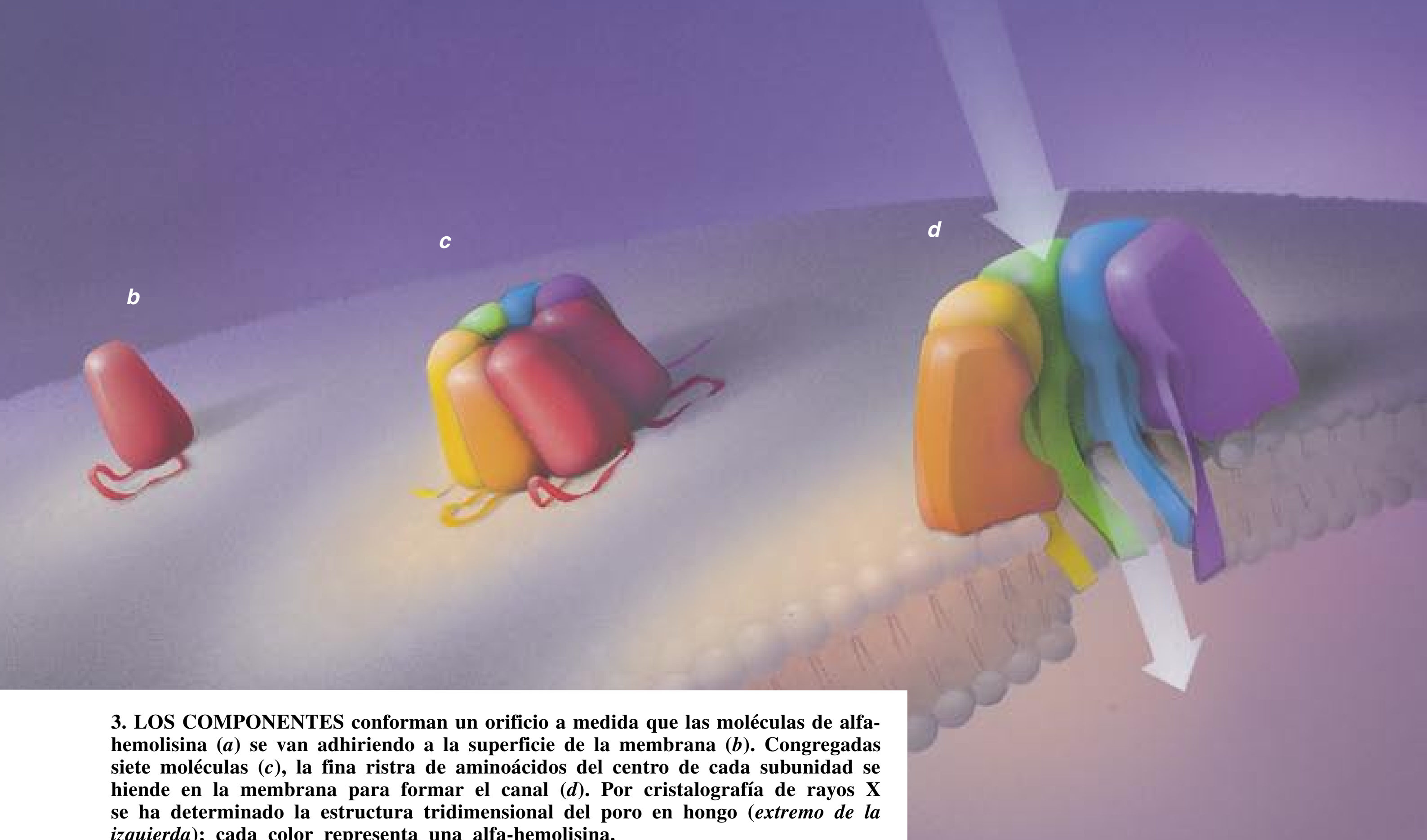








2. LOS POROS MICROSCOPICOS están constituidos por proteínas muy diversas. El autor ha estudiado derivados de alfa-hemolisina que acostumbran formar aberturas de unos dos nanómetros de diámetro. Algunas versiones pueden llegar hasta seis (*a*). La estreptolisina-O engendra poros de más de 30 nanómetros (*b*). Un tercer tipo de proteína, la de la capa S, desarrolla poros de tamaño uniforme; los poros que se muestran en *c* tienen unos tres nanómetros de diámetro.



3. LOS COMPONENTES conforman un orificio a medida que las moléculas de alfa-hemolisina (*a*) se van adhiriendo a la superficie de la membrana (*b*). Congregadas siete moléculas (*c*), la fina ristra de aminoácidos del centro de cada subunidad se hiende en la membrana para formar el canal (*d*). Por cristalografía de rayos X se ha determinado la estructura tridimensional del poro en hongo (*extremo de la izquierda*); cada color representa una alfa-hemolisina.

del liposoma en el momento de su preparación.

Hemos preparado, asimismo, un interruptor químico que se abre y cierra repetidamente mediante la unión de iones metálicos a la proteína. Los interruptores de este tipo podrían servir para la toma continua de medidas con biosensores. La sustitución de cinco aminoácidos diversos por cinco unidades del aminoácido histidina crea una zona donde el zinc y otros iones metálicos pueden trabarse a la proteína y, con ello, bloquear la formación del poro. El ensamblaje del poro prosigue cuando se elimina el metal. Una vez abierto el orificio, el ion puede volver a sellar el poro engarzándolo al canal central y obstruyendo el paso de otras moléculas. El proceso de sellar y resellar puede repetirse numerosas veces.

Esta estructura H5 (conjunto de cinco histidinas), así como otras hemolisinas emparentadas, sintetizadas por Stephen Cheley en Worcester, podrían ser eficaces biosensores para el seguimiento de metales contaminantes. Para la preparación de tales biosensores hemos contado con la colaboración de John J. Kasianowicz. La Marina de los Estados Unidos se muestra, a su vez, muy interesada en la medición rápida y continuada de iones metálicos en el agua del mar; le es vital disponer de sistemas capaces de detectar concentraciones muy bajas de metales vertidos por barcos enemigos. Por eso el Departamento de Investigación Naval ha financiado este paso de nuestro trabajo.

Aprovechando los progresos experimentados por la ingeniería de proteínas y los nuevos datos sobre la estructura de la alfa-hemolisina, Orit Braha ha mejorado en mi laboratorio la molécula de H5 al crear poros en los que no todas las subunidades son idénticas. En un ejemplo, seis de las unidades no se han alterado, pero hay una con un punto donde puede anclar un ion metálico. Cuando se engarza el ion metálico, cambia una corriente eléctrica (enviada a través del poro por aplicación de un campo de potencial). La fluctuación de esta corriente nos revela la concentración y la identidad del ion presente. Importa resaltar que la señal oscilante de un poro puede utilizarse para medir varios metales en un instante; con una batería de sensores se podría obtener información sobre mezclas complejas de sustancias. Otra ventaja de estos sensores reside en su tamaño: dado que basta la unión a un poro para obtener una lectura de corriente, estos sensores pueden alcanzar un tamaño mínimo.

Millares, y tal vez millones, de modificaciones diferentes podrían introducirse en las proteínas formadoras de poros, y generar así una batería extraordinaria de biosensores potenciales. En la actualidad trabajamos por obtener sensores de sustancias no metálicas. A este respecto, Kasianowicz acaba de demostrar la posibilidad de detectar hebras monocatenarias de ADN a su paso a través del poro.

Los hallazgos realizados con el complejo H5 ilustran de manera gráfica las interacciones entre biotecnología y ciencia básica. La estructura proporcionó no sólo un componente prototípico para un sensor, sino que aportó además información sobre el funcionamiento de los poros: el trabajo con H5 contribuyó a demostrar que la hebra central de la proteína natural tapiza el interior del poro.

Al pensar en el proyecto de alfa-hemolisinas que se activaran mediante un tercer tipo de interruptor, en que interviniera un estímulo físico, advertí la existencia de canales naturales de membranas que pueden activarse físicamente por impulsos mecánicos o voltajes aplicados a través de la membrana celular. En la mayoría de las casos, sin embargo, la activación por la luz es una opción con un atractivo especial: la luz no acostumbra entorpecer los procesos naturales

y puede aplicarse con un control exquisito espacial y temporal.

Además, en mis tiempos de doctorando en Harvard, me entrené en la preparación de compuestos químicos fotosensibles para investigar la estructura de las proteínas de membrana. No me sorprendió, pues, comprobar que, veinte años más tarde, la fotoquímica y las proteínas de membrana coincidían en mi investigación, aunque bajo un foco de atención distinto.

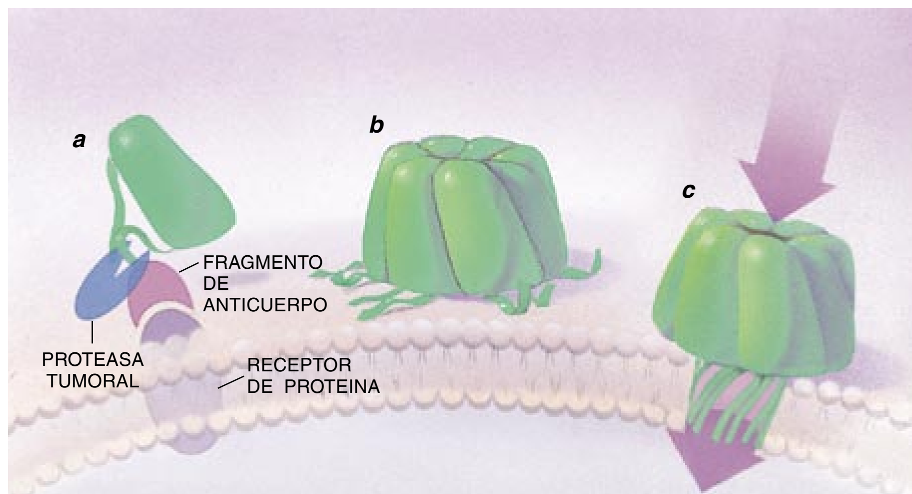
Nuestro enfoque se basaba en la estructura de compuestos de nitrobenzilo sensibles a la luz, que se utilizaron en síntesis orgánicas en los años sesenta en el laboratorio de Jack A. Barltrop, y adaptados posteriormente para pequeñas moléculas biológicas por Jack H. Kaplan. Nosotros obtuvimos un derivado nitrobenzilado, el ácido bromonitrofenilacético (BNPA), que después de unirse a la proteína cierra el proceso de formación de poros.

Para conseguirlo, técnicos de mi laboratorio introdujeron una cisteína en un lugar clave de la proteína. Cuando ese aminoácido reacciona con el BNPA, se inactiva la proteína. Para devolverle la operatividad, se la expone a luz ultravioleta, a longitudes de onda escasamente nocivas para la mayoría de las células. Con el tiempo se podría sintetizar moléculas formadoras de poros que se activen con luz de una determinada longitud de onda y se desactiven con otra longitud de onda diferente. Podría también construirse interruptores híbridos en los que una proteína se activara con la luz y desactivara con iones metálicos.

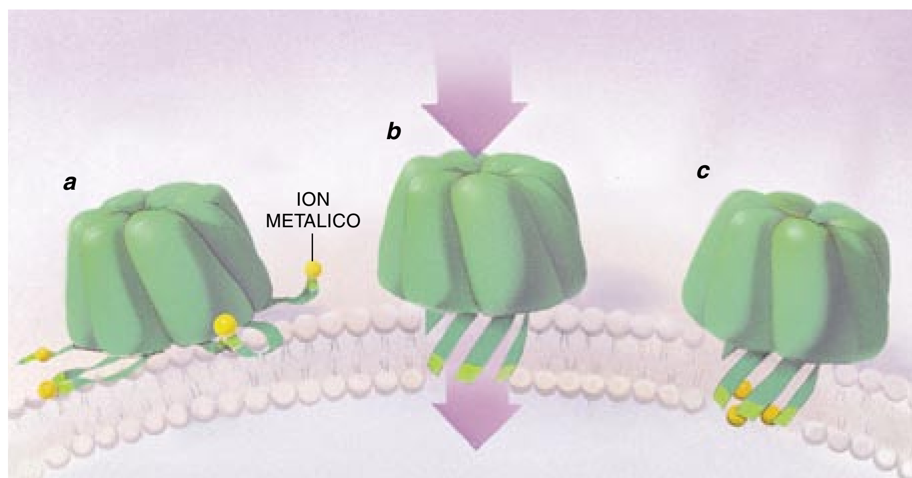
La técnica presente, sin embargo, tiene aplicaciones inmediatas en el laboratorio. A menudo se requiere tornar porosas determinadas células de un tejido, pero sin alterar las demás. Podemos entonces introducir pequeñas moléculas que, a modo de sondas, nos revelen la actividad celular, mientras las proteínas clave permanecen en el interior. En mi laboratorio, hemos conseguido hacer permeable una neurona en el seno de un conjunto de ellas mediante la simple iluminación de dicha célula. En la neurona seleccionada penetraron hemolisinas modificadas por métodos ingenieriles y expuestas a la luz; las neuronas restantes se mantuvieron indemnes. Con la ayuda de instrumentos ópticos avanzados, podremos permeabilizar zonas acotadas de una neurona iluminando el área de interés.

En el campo de la administración de fármacos se encuentra una de las aplicaciones más apasionantes de las proteínas formadoras de poros. Hablamos de introducir medicamentos en el interior de liposomas y, con la ayuda de alguna de las técnicas mencionadas, liberarlos en el momento deseado a través de los poros artificiales implantados en la membrana. Hay, además, un enorme interés en encapsular enzimas e incluso células enteras, protegiéndolas del ataque del sistema inmunitario. Una vez transportadas las enzimas hasta el punto de destino, podrían activarse y destruir sustancias tóxicas, que se acumulan en pacientes con ciertas afecciones genéticas, como la fenilcetonuria, en que el organismo no puede metabolizar adecuadamente el aminoácido fenilalanina. En esta enfermedad terminan por resentirse las células nerviosas.

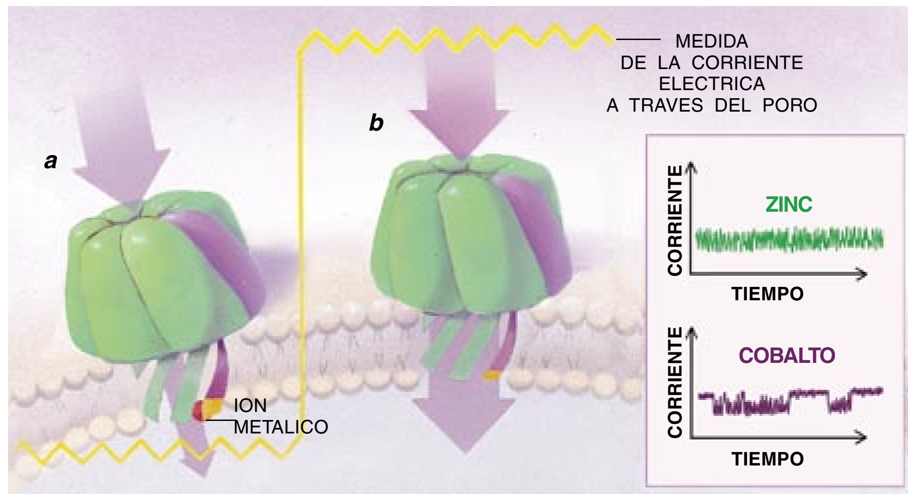
Podrían utilizarse células encapsuladas para la administración de hormonas en sujetos menesterosos de las mismas; por ejemplo, en la diabetes dependiente de insulina. Fármacos, enzimas y células dentro de membranas con poros artificiales proporcionarían un nivel de control sobre dónde, cuándo y cuánto de un determinado medicamento es preciso administrar.



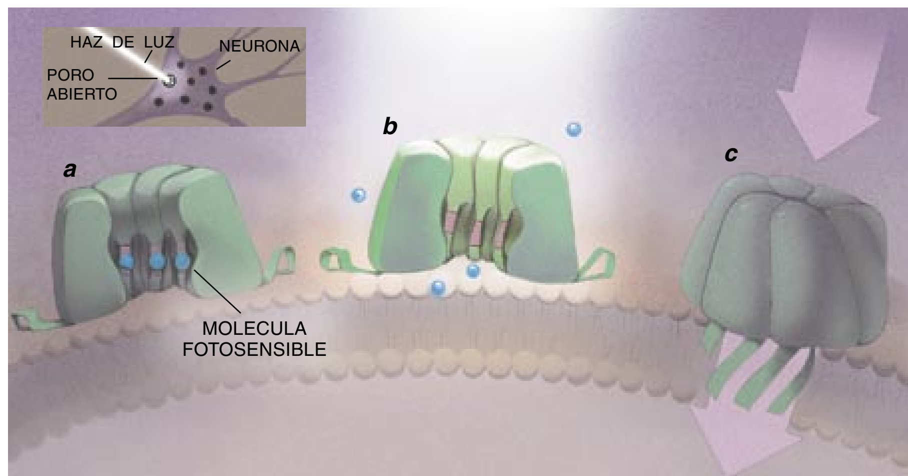
4. LA PERFORACION DE LAS CELULAS CANCEROSAS aumenta la permeabilidad. Hay versiones alteradas de alfa-hemolisina que incluyen un fragmento de anticuerpo que reconoce ciertos receptores en la célula cancerosa e impide la formación del poro. Cuando la alfa-hemolisina modificada llega a la célula cancerosa, las proteasas tumorales cortan el fragmento de anticuerpo (*a*). Tras la convergencia de siete subunidades de la proteína (*b*), el poro se abre (*c*).



5. PORTILLOS EN LAS CELULAS que se abren o cierran a voluntad. Cuando los iones metálicos se unen a la proteína modificada H5, se bloquea la formación del canal (*a*). Si la eliminación del metal abre el poro (*b*), la adición lo cierra (*c*). El equipo de Mehmet Toner recurre a esta técnica para introducir compuestos crioprotectores en las células vivas.



6. BIOSENSORES hechos de poros artificiales para detectar moléculas. Una alfa-hemolisina modificada (sólo una de las siete unidades, que aparece de color rosado, se ha alterado para que pueda unir iones metálicos) se cierra parcialmente cuando se le une un metal (*a*) y se abre cuando se elimina el metal (*b*). La magnitud y duración de estos cambios en la corriente eléctrica que se envía a través del poro identifica el tipo de metal presente (*recuadro*); la frecuencia de los cambios de corriente revela la concentración.



7. UN HAZ DE LUZ se abre paso hasta el interior celular. Podemos enfocar la luz con gran precisión sobre ciertas células, una neurona, por ejemplo (*recuadro*), y así controlar cuáles deseamos tornar permeables. Las moléculas fotosensibles unidas a la proteína alfa-hemolisina modificada impiden la formación de un poro (*a*) hasta que la luz las elimina (*b*). Una vez desechadas, se abre el poro (*c*).

En el nuestro y en otros laboratorios se trabaja en más proteínas bacterianas formadoras de poros con propiedades diferentes; entre ellas, la estreptolisina-O y las proteínas de la capa. El grupo que preside S. Uwe Sleytr, de la Universidad de Ciencias Agrícolas de Viena, ha adaptado ya láminas de poros de proteínas de la capa S para su uso en instrumentos de filtración. Ken Douglas y Noel A. Clark, de la Universidad de Colorado en Boulder, y Kenneth J. Rothschild, de la de Boston, han utilizado estas hojas como gradilla para formar rejillas de dimensiones nanométricas por deposición de vapores metálicos.

En mi laboratorio nos proponemos construir gatillos e interruptores en poros proyectados a voluntad —polipéptidos lejanamente basados en estructuras naturales— avanzando en el surco roturado por Maurice Montal, de la Universidad de California en San Diego. A mayor abundamiento, las proteínas modeladas y basadas en la estructura de la alfa-hemolisina podrían convertirse en agentes antimicrobianos si se lograra disgregar de manera selectiva la membrana externa de las bacterias.

Es mucho lo que aún queda por hacer mediante la ingeniería de proteínas en la propia alfa-hemolisina. Nosotros mismos estamos investigando técnicas con las que mejorar la estabilidad mecánica y térmica de los poros de hemolisina usados en biosensores. Otros indagan modificaciones químicas para reducir la inmunogenicidad de la alfa-hemolisina —su tendencia a desencadenar un ataque por parte del sistema inmunitario— para aplicaciones bioterapéuticas; la inmunogenicidad es por el momento el mayor obstáculo con el que se topa la bioterapéutica.

Si se superan esos retos, vendrán días de gloria para esta técnica. Las proteínas formadoras de poros podrían utilizarse como componentes de instrumentos electrónicos moleculares. Aunque las proteínas son grandes para tal menester de acuerdo con los patrones actuales, poseen propiedades refinadísimas, como la capacidad de reconocer otras moléculas, algo que no podría inducirse en materiales inorgánicos. Los cristales bidimensionales que se forman con la alfa-hemolisina y las proteínas de la capa S podrían servir de plantillas para la síntesis ordenada de conjuntos de moléculas en la nueva ciencia de la nanotécnica que ha echado a andar. Podríamos pensar incluso en crear membranas que, al permitir el paso selectivo de determinadas moléculas, se emplearan en la elaboración de filtros que permitirían purificar fármacos, agua contaminada o sangre. En el campo de las proteínas formadoras de poros, ahora sólo en sus comienzos, se vislumbra un futuro muy prometedor.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

STRUCTURE OF STAPHYLOCOCCAL α-HEMOLYSIN, A HEPTAMERIC TRANSMEMBRANE PORE. Langzhou Song, Michael R. Hobaugh, Christopher Shustack, Stephen Cheley, Hagan Bayley y J. Eric Gouaux en *Science*, vol. 274, págs. 1859-1866; 13 de diciembre, 1996.

REVERSIBLE PERMEABILIZATION OF PLASMA MEMBRANES WITH AN ENGINEERED SWITCHABLE PORE. Michael J. Russo, Hagan Bayley y Mehmet Toner en *Nature Biotechnology*, volumen 15, n.º 3, págs. 278-282; marzo de 1997.

DESIGNED PROTEIN PORES AS COMPONENTS FOR BIOSENSORS. Orit Braha, Barbara Walker, Stephen Cheley, John J. Kasianowicz, Langzhou Song, J. Eric Gouaux y Hagan Bayley en *Chemistry and Biology*, vol. 4, n.º 7, págs. 497-505; julio de 1997.

TALLER Y LABORATORIO

Shawn Carlson

Grabando los sonidos de la vida

Hace unos meses, en las horas anteriores al alba de una fría mañana de invierno, mi vida cambió para siempre. Serían las tres de la madrugada, cuando me despertaron un par de vigorosas manos que me asían y me sacudían el torso violentamente. Desperté empavorecido, esperando hallarme frente a un asesino loco blandiendo un garrote o un hacha. Pero no, a quien vi fue a mi esposa que, sobre mí, mostraba una extraña expresión mezcla de miedo y alegría. Fijé mi mirada en ella, preguntándome por un instante si se habría vuelto loca de repente. "Cariño," me soltó de golpe, agitando frenéticamente ante mis confundidos ojos una varita de plástico, "¡estoy embarazada!"

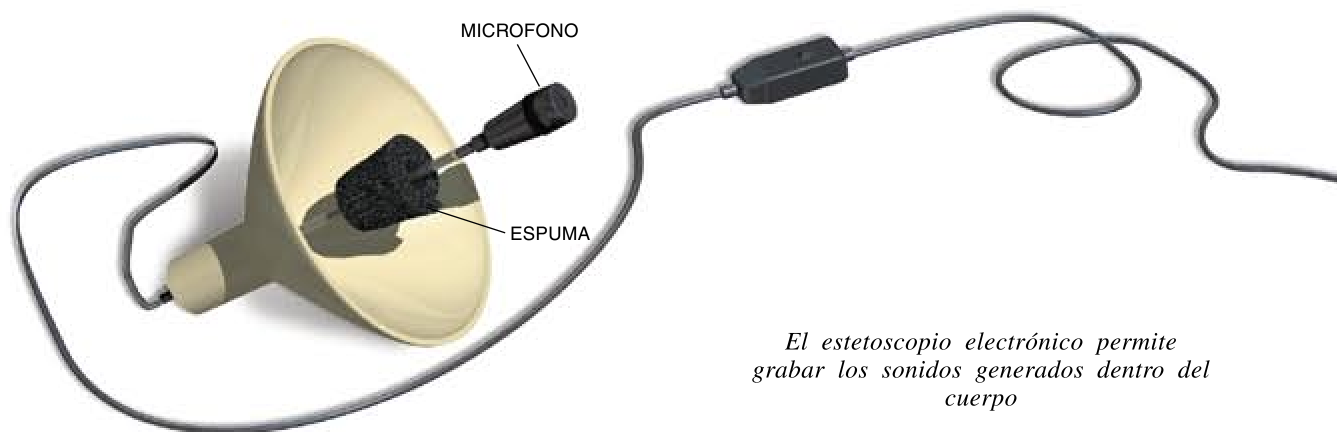
Era, desde luego, la mejor noticia en toda nuestra vida. Y, siendo científicos los dos, no tardamos mucho, tras celebrar el hecho con una taza de cacao caliente, en comenzar a cavilar acerca de las oportunidades que nos brindaba el embarazo de Michelle. Mi deseo era averiguar la cantidad de entropía que el crecimiento de nuestro bebé habría añadido al universo en el momento del nacimiento. Incluso ideé un experimento sencillo; para ello Michelle tendría que ponerse en remojo repetidamente durante el embarazo en una tinaja aislada y llena de agua muy tibia, para medir cada vez cuánto tardaba el calor de su cuerpo en caldear el agua. Pero, ay, Michelle me había explicado sin lugar a dudas que ese número fundamental tendría que seguir en el misterio (y un magnífico proyecto científico de aficionados para que lo prosiguiera otra pareja en espera de un hijo).

Pero a mi mujer le pareció bien intentar otros experimentos de protocolos menos exigentes. Hace dos o tres semanas monté un estetoscopio electrónico capaz de detectar cualquier sonido que se genere dentro de un cuerpo humano. Al principio, esperaba registrar los latidos del corazón y los movimientos del bebé. Pero el instrumento funcionó mejor que lo que yo esperaba. Michelle y yo ya hemos grabado innumerables sonidos procedentes de nuestros corazones, pulmones y tractos gastrointestinales; y unos cuantos gorjeos realmente extraños que no parecen emanar de ningún órgano en particular. Puede que también el lector desee escuchar en su propio cuerpo o grabar los sonidos internos de su perro o gato doméstico. Los interesados en la fauna marina podrán adaptar el aparato para emplearlo como hidrófono bajo el agua. En cualquier caso, para guardar los sonidos puede servir un magnetófono corriente.

En el instrumento se combinan técnicas del siglo XIX con otras recientes. Durante más de 150 años, los médicos han confiado en la geometría, y no en los circuitos electrónicos, para amplificar los sonidos del interior del cuerpo. Casi toda la energía sónica que entra por la pieza pectoral del estetoscopio se canaliza hacia el interior de un tubo hueco, se encamina luego a través de unos auriculares y, por último, se deposita en los tímpanos del médico. Al concentrar el sonido de este modo se aumenta su intensidad aproximadamente en la misma relación que hay entre las áreas de la pieza pectoral y la interior del tubo hueco.

Puede el lector basarse en esa técnica para fabricarse un práctico estetoscopio a partir de un pequeño embudo. Aplíquese la boca de éste sobre el pecho de un amigo. Cuando se oprima el oído contra el cuello del embudo (con cuidado, para no hacerse daño en el tímpano), se percibirá perfectamente el latido del corazón y el movimiento de los pulmones. Un trozo de tubo de Tygon, con un extremo encajado sobre el cuello del embudo y el otro introducido delicadamente en su canal auditivo, nos permitirá distinguir los ruidos generados en nuestro interior.

Una vez amplificados mediante un embudo, esos sonidos puede captarlos un micrófono para su posterior procesamiento electrónico. Los transductores microfónicos de calidad no cuestan mucho. Con unas 3000 pesetas podemos improvisar un sistema bastante apañadito. Necesitaremos un elemento condensador de tipo electrete, un amplificador operacional de bajo ruido, cable de altavoz apantallado y resistencias y condensadores de tipo corriente. (Los partidarios del hágalo-usted-mismo pueden consultar los detalles en la página Web de la Society for Amateur Scientists.)



El estetoscopio electrónico permite grabar los sonidos generados dentro del cuerpo

Pero es mucho más fácil comprar un pequeño micrófono lavalier (también llamado micrófono “de pinza de corbata”). Los modelos omnidireccionales son más baratos y ofrecen unas prestaciones superiores a las de casi todas mis creaciones más lujosas.

Sujetaremos el micrófono dentro del embudo con un trozo de gomaespuma o un material similar. Insertaremos el micrófono en el cuello del embudo tal como se muestra en la figura. Yo empleé una tira corta y fina de espuma antiestática para afianzarlo. Hay que rodear la tira varias veces en torno al micrófono. Luego, el conjunto entero tiene que sujetarse dentro del cuello del embudo de tal modo que el micrófono quede exactamente en el vértice del cono.

Para someter a prueba el sistema, oprimiremos el extremo abierto del embudo contra el tórax y pondremos en marcha el magnetófono. Si éste es estéreo, asegúrese de poner el volumen al mínimo posible. Si pretendemos grabar latidos cardíacos y escucharlos por los altavoces a la vez, corremos el riesgo de obligar al vecindario a una sesión ensordecedora de acoplamiento acústico. Al principio intenté salvar esta dificultad empleando auriculares. Grave error. La sensibilidad del micrófono era tal, que captaba los sonidos más tenues generados por los auriculares y los realimentaba al amplificador. El resultado fue una dolorosísima descarga de alta frecuencia sobre mis oídos, con lo que el experimento acabó en seco.

Muchos magnetófonos poseen un indicador de volumen que muestra la amplitud de la señal que se graba. Si el nuestro carece de ese detalle, deberemos ajustar la amplificación global actuando en el mando de volumen, grabando durante algunos segundos y seguidamente escuchar de qué modo suena la pista recién grabada. Repetiremos la operación hasta que la señal sea lo más alta posible sin que se distorsione.

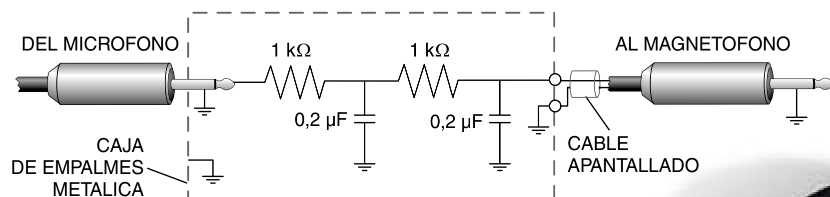
Para nuestro infortunio, el micrófono no grabará sólo los sonidos corporales pretendidos; captará cualesquiera ruidos extraños que puedan estar contaminando el ambiente acústico local. Para anticiparse a los problemas, vale la pena emplear un sencillo circuito RC como filtro de paso bajo para bloquear todas las señales de frecuencia superior a unos 800 ciclos por segundo [*véase la figura*]. Ese filtro no afecta a la mayoría de los sonidos corporales, pero contribuye a eliminar el gorjeo de los pájaros, los bocinazos de los automóviles y los estéreos de los hijos del vecino. Aunque puede bastar con una pareja resistencia-condensador, dos de estas parejas eslabonadas, tal como se muestra, eliminan más ruidos, especialmente cerca de la frecuencia de corte. Nos aseguraremos de que estamos empleando cable apantallado y que los componentes electrónicos quedan alojados en una caja de empalmes totalmente metálica y bien conectada a tierra.

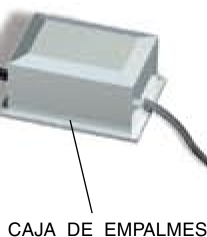
Por mi parte, tomé los 800 ciclos por segundo como frecuencia de corte de manera completamente arbitraria. En función de cada caso particular, podrían conseguirse mejores resultados estableciendo otro límite. La frecuencia de corte (en ciclos por segundo) de un filtro RC simple no es más que el inverso del producto de la resistencia (en ohms) por la capacidad (en farads) y por 2π (6,28).

Michelle y yo hemos venido grabando regularmente desde principios de julio los latidos del corazón de nuestro hijo. Hemos observado que la intensidad del sonido crecía sin parar durante los últimos meses y esperamos notar pronto la aminoración del ritmo de los latidos que acompaña al desarrollo de los bebés. (Es característico que en el cuarto mes de embarazo el ritmo cardíaco sea de unos 160 latidos por minutos; hacia el noveno mes el ritmo normalmente disminuye a menos de 140 latidos por minuto.)

Dedicando tiempo a escuchar las actividades internas de nuestro hijo aún no nacido nos ha acercado a él de un modo especial. Esta emoción no es disímil a la que experimentan muchos científicos, tanto profesionales como aficionados, quienes desarrollan un profundo sentido de intimidad con los temas de los que se ocupan. A menudo es esa conexión personal la que impulsa a los científicos a proseguir en la búsqueda del conocimiento. Los motivos para acometer un programa de observaciones cuidadosas son, por supuesto, particularmente fuertes cuando el objeto es la propia hija que pronto nacerá. (Los sonidos corporales no revelan el sexo; ello lo hizo un examen ultrasónico rutinario.)

Para información acerca de este proyecto u otras actividades para científicos aficionados, escríbase a la Society for Amateur Scientists, 4735 Clairemont Square, Suite 179, San Diego, Ca 92117. Puede asimismo visitarse la página World Wide Web de la Sociedad en www.thesphere.com/ SAS, telefonear al 619-239.88.07 o dejar un mensaje en el 800-873.87.67.





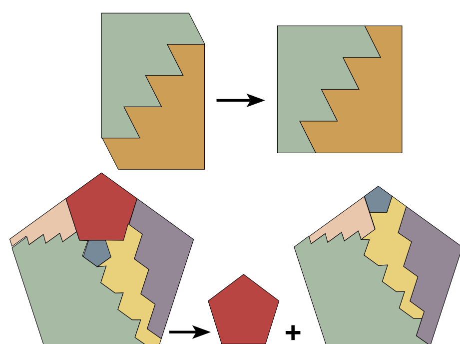


JUEGOS MATEMÁTICOS

Ian Stewart

Rompecabezas dobles

En los primeros tiempos de sus carreras, los problemistas Sam Loyd y Henry Ernest Dudeney —americano el primero, inglés el segundo— colaboraban en una sección fija, de la revista *Tidbits*, dedicada a las matemáticas recreativas. Loyd preparaba los problemas y rompecabezas; Dudeney, con el seudónimo de "La esfinge", se reservaba los comentarios y otorgaba los premios. Empero, la colaboración se tornó al poco en rivalidad, y nuestros dos personajes tomaron sendas distintas. Y al hacerlo, crearon una industria de matemáticas recreativas en ambas riberas del Atlántico, planteando cuestiones matemáticas tan apasionantes cuan desconcertantes dentro de breves cuentecillos.



1. La escalinata es una técnica útil para hallar disecciones

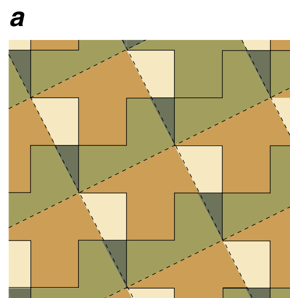
Tenemos un ejemplo típico de su trabajo en el rompecabezas del palanquín de Loyd. El problema matemático consiste en descomponer el palanquín en el mínimo número posible de piezas que, ensambladas, formen un cuadrado; Loyd incluía el problema en un cuentecito acerca de una damisela, cuyo palanquín se plegaba sagazmente para proteger a su ocupante de la lluvia.

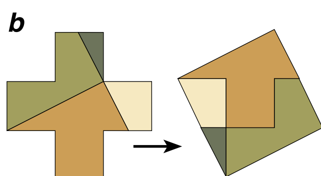
Los rompecabezas de esta clase se conocen por problemas de disección. No tardará en publicarse un libro maravillosamente entretenido sobre este tema tan clásico. Su título es *Dissections*: *Plane and Fancy*, por Greg N. Frederickson (Cambridge University Press).

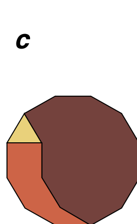
La noción matemática fundamental que subyace bajo todos los problemas de disección es la de área. Al cortar una figura y reagrupar las piezas, el área total no varía. La verdad es que bajo este enunciado, en apariencia obvio, se ocultan matemáticas de gran profundidad. Curiosamente, tal principio resulta ser falso en tres dimensiones si se permite que las "piezas" encierren cierta complejidad. En la famosa paradoja de Banach-Tarski, una esfera maciza se "descompone" en seis piezas, que, reagrupadas, forman dos esferas macizas, cada una del mismo tamaño que la original. El matemático polaco Stephan Banach y su colaborador polaco-estadounidense Alfred Tarski demostraron este desconcertante teorema en 1924. El resultado es válido desde el punto de vista lógico, pero sigue pareciendo tan estrafalario, que la denominación de "paradoja" ha llegado hasta hoy.

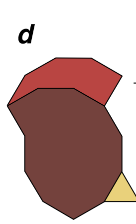
¿Cómo es posible que el volumen se duplique, por mera reubicación de las piezas? La clave consiste en utilizar piezas tan raras, que no posean un volumen bien definido, algo así como nubes esféricas de polvo infinitamente complejo, en vez de objetos individuales y conexos. Doy un resumen de estas ideas en mi libro *From Here to Infinity* (Oxford University, 1996), que son descritas, por otra parte, en toda su gloria y plenitud en *The Banach-Tarski Paradox*, por Stan Wagon (Cambridge University Press, 1985).

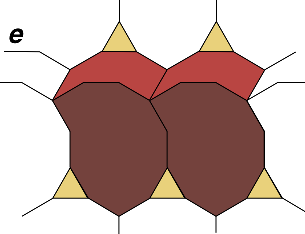
No existe, desde luego, ningún procedimiento práctico para llevar a cabo esta disección con un objeto material. (Los comerciantes en metales preciosos pueden exhalar un suspiro de alivio.) Pero sí pone de manifiesto lo muy sutil que es el concepto de volumen. Curiosamente, en el plano no son posibles descomposiciones "paradójicas", en las que cambie el área, por muy complejas

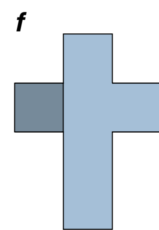


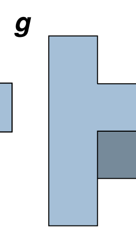


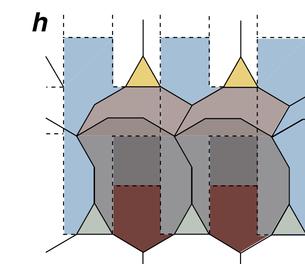


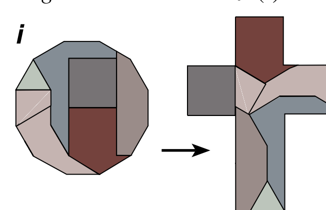










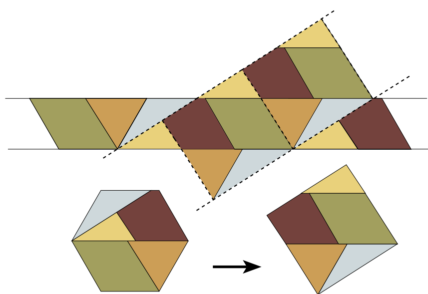


2. Los teselados del plano pueden permitir la "extracción" de disecciones, como en la transformación de la cruz griega en un cuadrado (a y b). *Más elaborada es la transformación de un dodecágono* (c) *en una figura* (d) *que tesela el plano* (e), *lo mismo que la cruz* (f y g). *La superposición de las dos teselaciones* (h) *conduce a la disección del dodecágono en una cruz* (i)

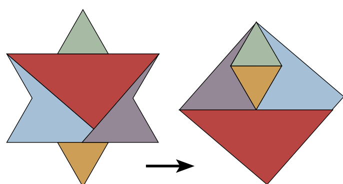
que sean las piezas, como demostró Tarski en 1925. (Sí son posibles, en cambio, sobre la superficie de una esfera.)

Cuando las piezas en que se descompone el objeto están pulcramente cortadas y poseen área y volumen bien definidos, no existen construcciones contrarias a la intuición. De hecho, en 1833, P. Gerwein, un teniente del ejército prusiano, dio respuesta a una cuestión fundamental sobre disecciones planteada por el matemático húngaro Farkas Wolfgang Bolyai. Gerwein demostró que, dados dos polígonos planos cualesquiera de la misma área, existe un conjunto finito de piezas poligonales idénticas que, debidamente ensambladas, permiten construir cualquiera de los dos. Este resultado recibe el nombre de teorema de Bolyai-Gerwein (si bien, al parecer, el primero en demostrarlo fue un tal William Wallace, en 1807).

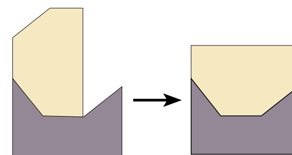
El teorema de Bolyai-Gerwein no se generaliza a tres dimensiones. En 1900, el gran matemático alemán David Hilbert preguntó si dos poliedros cualesquiera del mismo volumen serían "equivalentes por disección", vale decir, si podrían ensamblarse a partir del mismo conjunto de piezas poliédricas. Un año después, el topólogo germano-americano Max Dehn demostró el sorprendente resultado de que un cubo y un tetraedro de igual volumen no eran equivalentes por disección.



4. Franjas ilimitadas pavimentadas por figuras diferentes pueden dar lugar a disecciones, en este caso, la de un hexágono en un cuadrado (arriba). *Análogamente, una estrella de David puede convertirse en un cuadrado* (abajo)







3. El rompecabezas del palanquín y su solución

Lo verdaderamente entretenido consiste en hallar ejemplos elegantes y claros de figuras que sean equivalentes por disección. Cabe lograr algunos resultados, a través de tanteos, pero sólo si se tiene una vívida imaginación espacial. Una de las virtudes de *Dissections* es que explica muchos de los principios generales que se utilizan para hallarlas.

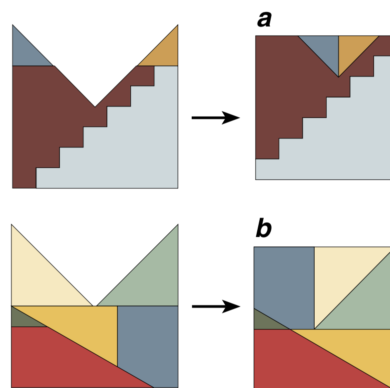
Entre esos principios tenemos el que consiste en cortar la figura a lo largo de una "escalinata", que se desplaza después un peldaño, creando así una figura diferente. David Collison, un entusiasta de las disecciones de origen inglés, que ha trabajado como programador y asesor informático en los Estados Unidos, ha ideado disecciones muy elaboradas basadas en este principio. Su disección del pentágono [*véase la figura 1*] ofrece una demostración por disección de la conocida igualdad "pitagórica" $5^2 + 12^2 = 13^2$.

Otro método general es el llamado principio de teselación. Son muchas las figuras interesantes que pueden quedar inmersas en teselaciones —patrones de embaldosado— que recubren el plano. Al superponer dos diferentes, formadas cada una por losetas de la misma área, con frecuencia resulta posible "extraer" una disección que lleve de una figura a la otra. Una cruz griega, por ejemplo, puede quedar así descompuesta y transformada en un cuadrado.

Una aplicación mucho más elaborada de la misma idea fundamental —la disección de un dodecágono y su conversión en cruz latina— se debe a Harry Lindgren, autor de *Geometric Dissections* (Van Nostrand, 1964). El primer paso, que es el más difícil, consiste en cortar el dodecágono y reorganizarlo en una figura que pavimente el plano. También se puede realizar una teselación del plano con la cruz latina (de la misma área que el dodecágono). Al comparar las dos teselaciones se llega a la disección requerida.

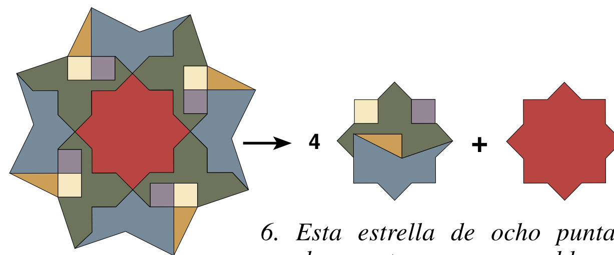
Un tercer método es el de la franja. Las dos figuras se descomponen en piezas que, en conjunto, permiten pavimentar una franja infinitamente larga. Después, al superponer las franjas, determinan una disección. Del método de la franja se deduce una descomposición de un hexágono que da un cuadrado, obtenida por Paul Busschop. (Busschop, belga, escribió un libro sobre solitarios, publicado póstumamente por su hermano.) Harry Bradley, docente en el Instituto de Tecnología de Massachusetts en 1897, descubrió cómo descomponer por ese mismo método una estrella de David y convertirla en un cuadrado.

Los rompecabezas de disección tienen tanta fuerza, que en ocasiones la vista puede confundir a la mente. En 1901, Loyd cometió un error memorable —del que Frederickson dice que fue "tal vez el mayor de sus deslices"— cuando afirmó que se podía convertir una "mitra" (un cuadrado del que se ha suprimido



5. Descomposición falaz de Sam Loyd. En apariencia, transforma una mitra en un cuadrado (a). *El cuadrado es, en realidad, un rectángulo; la disección correcta es la* (b)

un cuadrante) en un cuadrado. Desdichadamente el presunto cuadrado es en realidad un rectángulo cuyos lados están en la proporción 49 : 48. Irónicamente, le dio el nombre de Rompecabezas “Alec, el listo.” Dudeney, su gran rival, hizo notar el error en 1911 y aportó la descomposición correcta que se indica en la figura. Por tanto, si los lectores desean buscar disecciones de su propia cosecha, deberían admitir el consejo que tantos padres han dado a sus vástagos: “Pasadlo bien —pero tened cuidado.”



6. Esta estrella de ocho puntas puede recortarse y reensamblarse, creando cinco estrellas semejantes a la inicial

Acuse de recibo

“Vacas en el laberinto”, el artículo de febrero de 1997, debió, sin duda, hacer pasar buenos ratos. Se trataba de un laberinto autoalusivo que se resolvía moviendo uno de dos lápices, que habían de partir de los recuadros (1,7) y acabar con al menos uno de ellos apuntando a META. El aspecto crucial era la notable “regla 60” del recuadro 60, que suspendía hasta nuevo aviso las instrucciones escritas en rojo.

Antes de entrar en la correspondencia, lamento informar de que el libro *Supermazes*, que entonces cité, no se publicará. Su autor, Robert Abbott, me lo notificó por correo electrónico, pero me retrasé en leerlo y no pude corregir el artículo a tiempo.

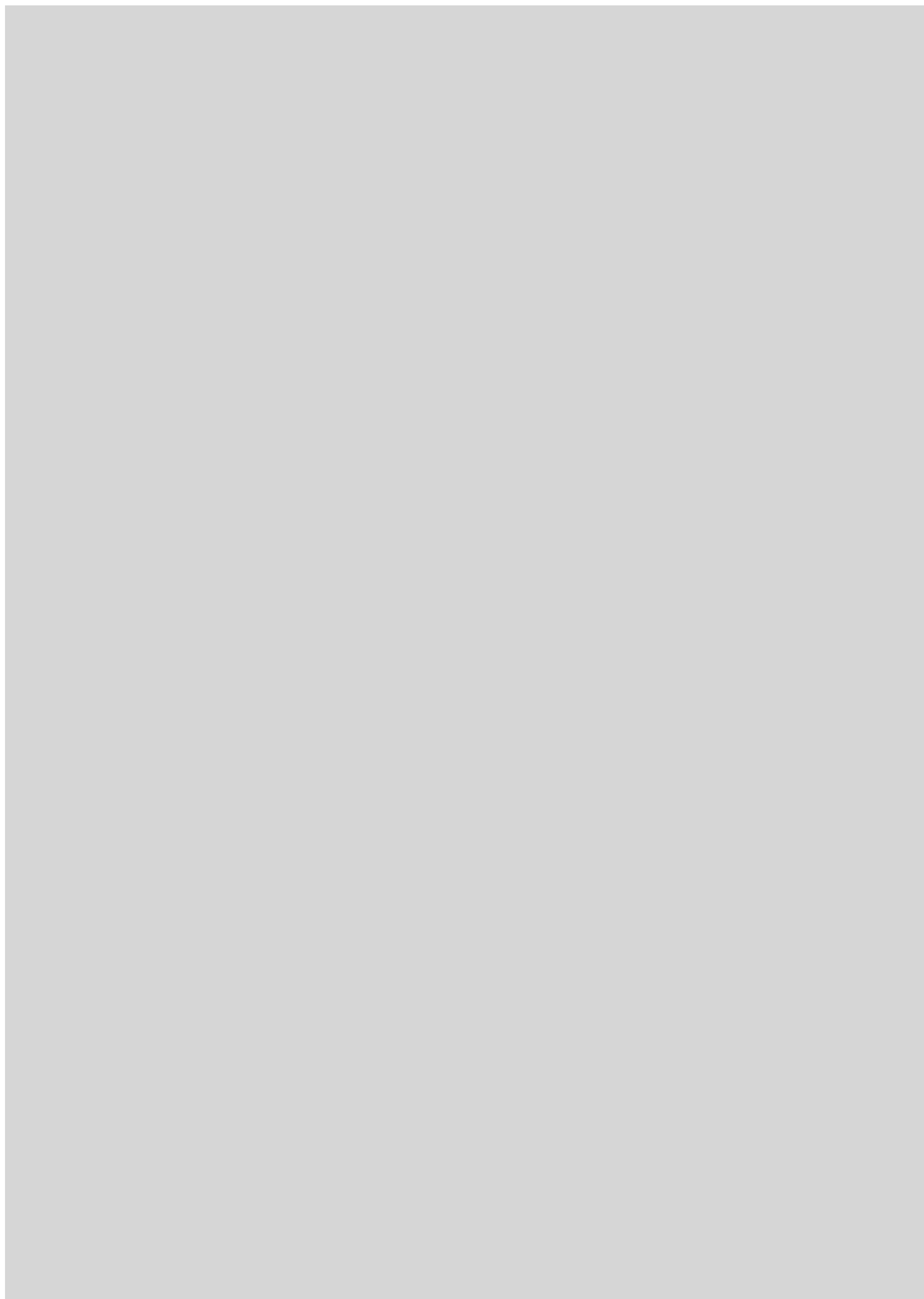
Las cartas de los lectores me causaron no pocos sobresaltos, por ofrecer soluciones más breves o más elegantes, o por indicar errores en mi solución y cosas por el estilo. Fueron varios quienes afirmaron que yo me equivocaba al decir que toda solución exigía llegar a los recuadros (50,50) no estando vigente la regla 60. Sin embargo, cuando comprobé tales soluciones, descubrí que en todos los casos había algún error. Aunque no aludiré a nadie, pues cada uno sabrá su caso, estos corresponsales merecen una explicación. Usaré la misma notación que en el artículo, indicando en rojo el lápiz que se ha de mover, y con un asterisco, que la regla 60 está en vigor.

Uno de los intentos de los lectores empezaba (1,**7**) (1,**26**) (1,**55**) (**1**,15) (**9**,15) (35,**15**) (35,**40**)... Pero cuando uno mueve desde la posición (33,15), la instrucción contenida en 15 dice “¿Está el otro lápiz en un recuadro cuyo número es múltiplo de 5?” La respuesta es “sí”, y ello nos conduce a (35,5), no a (35,40).

También había un error en otra de las presuntas soluciones: (**1**,7) (**2**,7) (15,**7**) (15,**26**) (**15**,61) (**40**,61) (**60**,61) (**25**,61)* (**7**,61)* (**26**,61)* (**61**,61)* (**1**,61)* (**2**,61)* (**15**,61)* (**40**,61)* (65,**61**)* (**75**,1) (**50**,1) META. Su autor señalaba que “la regla 60 no está cancelada” a resultas de la maniobra desde (65,**61**)* a (**75**,1). En este caso hay un malentendido. Si uno ha llegado a (65,61)* y opta por mover el lápiz 61, dado que la regla 60 está en vigor, es preciso desechar el texto en rojo —que constituye el total de la casilla 61—. Lo cual nos lleva a (65,1) porque la regla 60 nos dice que tomemos la salida “sí” para el lápiz elegido. Para llegar a (75,1), es preciso obedecer al texto de la casilla 61, que nos manda mover ambos lápices —lo que no es posible cuando está en vigor la regla 60.

Al igual que las restantes instrucciones, la regla de la casilla 60 solamente es efectiva cuando se elige mover el lápiz que apunta hacia dicho recuadro, no en cuanto uno de los lápices llega a la casilla 60. Mi solución conlleva un movimiento de (26,60) a (55,60) sin estar en vigor la regla 60. Dado que muevo el lápiz 26, la regla 60 no se activa en ese momento.

—I. S.



NEXOS

James Burke

Ramilletes de salud



A puesto a que el lector (como yo mismo) ignora que las lilas echan flores cuando la suma de los cuadrados de las temperaturas medias diarias (medidas en grados Celsius) desde la última helada llega a 4264. Debemos esta curiosidad botánica al astrónomo y matemático belga Adolphe Quetelet, cuya obsesión por los números le llevó a idear en 1835 un concepto del que estoy seguro que el lector sí habrá oído hablar: *l'homme moyen* (el hombre medio).

Quetelet recogió información sobre la propensión individual al delito, la embriaguez, el matrimonio, la muerte, la altura o el suicidio. Al final, descubrió tantas regularidades en esos números que le llevaron a creer en una suerte de "física social", ciencia que describiera el comportamiento humano sobre bases matemáticas.

Quetelet expuso algunas de estas ideas aún embrionarias en la sesión anual de la Asociación Británica para el Progreso de la Ciencia correspondiente a 1833. Celebrada en Cambridge, consiguió persuadir allí a un grupo de mentes inquietas como la suya para que se embarcaran en la fundación de la Sociedad Estadística de Londres y así perpetuar la causa. Por aquel entonces, el interés británico por el análisis social alcanzaba proporciones aterradoras: las condiciones de vida de las superpobladas ciudades industriales habían llevado a las clases trabajadoras a actitudes próximas a la revolución. Se empezó a extraer estadísticas sobre asuntos tan capitales como cuántas familias pobres podían cantar tonadas alegres, cuántas madres famélicas eran capaces de tejer, cuántas sucias cabañas mostraban en sus paredes máximas morales y otros de tenor parejo.

El primer presidente de la Sociedad Estadística londinense fue uno de los asistentes a la reunión de Cambridge, un hombre con más ideas que tiempo para desarrollarlas. Entre sus proyectos se encontraban un tubo parlante que conectara Londres con Liverpool y una versión automática del tres en raya. Se trataba de Charles Babbage, un gran matemático, quien llegó a inventar un par de zapatos para caminar sobre el agua. La mayor parte de su vida, sin embargo, la dedicó a sonsacar dinero para fabricar dos máquinas calculadoras con engranajes de tal complejidad que nunca construyó. Una de ellas usaba tarjetas perforadas y disponía de programas almacenados, y eso es todo lo que voy a decir al respecto. Ada, condesa de Lovelace, ya dijo más que suficiente por nosotros.

La dama protegió, promocionó y presentó a Babbage ante quienes realmente podían echarle una mano. Se cuenta que hizo tal en agradecimiento por haberle suministrado un sistema para ganar en las apuestas. Al igual que sus máquinas, el método nunca funcionó y levantó una escandalera. Lo mismo que el progenitor de Ada, que tuvo una corta vida, Lord Byron. Pasó la mayor parte de su edad adulta viajando por el Mediterráneo oriental, donde coincidió, en 1809, con un tipo raro, John Galt, que maquinaba un negocio redondo de proporciones internacionales.

En aquellos tiempos, el bloqueo continental impuesto por Napoleón estaba arruinando la industria exportadora del Reino Unido. Así que Galt proyectó llevar los productos británicos hasta Estambul e introducirlos en Europa por la puerta trasera, cruzando la frontera húngara. Tan pronto como se puso en marcha, el plan de Galt se vino abajo. Su principal cliente, James Finlay, un algodonero de Glasgow, se lo quitó de encima y creó su propia red de contrabandistas hasta la derrota de Napoleón.

Finley hizo tratos con todos los capitostes de la revolución industrial, Richard Arkwright incluido. En 1771 el mecanismo hidráulico de Arkwright había transformado la artesanía algodonera en un sistema industrial. Una sola fuente de energía (el agua) movía cientos de rodillos y husos que sacaban el hilo, lo trenzaban y dejaban listo para el telar. Cinco años después apareció la patente sobre una fuente de energía (el vapor) que no sólo movía la máquina Arkwright, sino cualquier otra que cupiera imaginar. La máquina de vapor de James Watt se difundió tanto, que no daba abasto al papeleo. Y se le ocurrió una máquina copiadora. Se escribía o realizaba cualquier diseño que se quisiera reproducir en un papel con una tinta especial, entre cuyos ingredientes se encontraba la goma arábiga. Luego se pasaba el original sobre papel humedecido, en el que aparecía la copia (que duraba 24 horas).

En 1823 Cyrus Dalkin, de Concord, en el estado de Massachusetts, mejoró la idea. Cubrió una cara de la hoja de papel con parafina y carbón. La presión sobre la hoja transfería lo trazado a una hoja colocada debajo. Dalkin llamó a su invento papel carbón y lo vendió a Associated Press. En 1868, la AP cubrió un ascenso en globo realizado por Lebbeus Rogers, fabricante de galletas. Roger se encontraba en las oficinas de la AP para una entrevista cuando vio el papel de Dalkin en acción. En un momento Rogers olvidó galletas y globos y se introdujo en el negocio del papel carbón. En 1873 asistía a una demostración de la nueva y asombrosa máquina de escribir, cuando convenció a la persona que estaba tecleando para que probara una de sus hojas de carbón. El resto es historia (que, para variar, se repite).

La máquina de escribir que vio Rogers la había fabricado E. Remington, un fabricante de armas. Su compañía tenía capacidad de sobra y



las máquinas herramientas necesarias para hacer barrenos. La demanda de barrenos que Remington fabricaba antes había caído al acabar la Guerra Civil y los pedidos de armas habían experimentado un descenso catastrófico. Las armas construidas por Remington han sido de las más exitosas que jamás se han construido, sólo igualadas en ventas por las de Samuel Colt, que se dedicó a fabricar pistolas porque fracasó con las minas. Es posible que esto se deba a que en 1844, tras hundir un barco en el río Potomac a cinco millas de distancia, se negó a revelarle el secreto a la Marina y ellos, por tanto, se negaron a pagarle.

Immanuel Nobel fue más abierto a la hora de descubrir sus técnicas de minería para hacer un buen negocio, cuando los rusos le solicitaron que fabricara minas para ellos. Cuando en 1853 empezó la guerra de Crimea, la "Fundición de hierro colado flotante y mecanizada del Coronel Ogarev y del Sr. Nobel" llevaba 12 años colocando minas en la frontera rusa. Uno de los lugares sembrados fue el puerto de Sebastopol. La flota aliada que apoyaba a las tropas de Crimea se vio forzada a fondear cerca de Balaklava, donde fue destruida por un huracán el trece de noviembre. Un cargamento de 7000 toneladas de suministros médicos y ropa desapareció en el fondo del mar, dejando a las tropas británicas a merced de un terrible invierno de neumonía, hambruna y disentería.

Una semana antes, una mujer extraordinaria llamada Florence Nightingale había llegado a Crimea para pasar, junto con sus 38 enfermeras, un invierno cruel en el que descubriría hasta qué punto eran realmente deficientes los servicios médicos del ejército británico. A sus oídos ya habían llegado rumores tales como que los médicos militares británicos recomendaban fumar o, en su defecto, dejarse bigote (para filtrar los gérmenes) como medidas óptimas para evitar las enfermedades. En un área de recuperación, mil soldados con diarrea compartían veinte orinales. En los hospitales se realizaban operaciones sobre suelos cubiertos de sangre. Las heridas podían dejarse sin tratar durante cinco semanas. Los índices de mortalidad hospitalaria rondaban el cincuenta por ciento en la mayoría de los casos. Al final de la guerra, se contabilizaron 18.058 bajas por parte británica, nueve de cada diez debidas a enfermedades. Cuando los periódicos publicaron estos datos a su vuelta, se levantó una ola de indignación. Gracias a las mil páginas del informe elaborado por Nightingale, llenas de detalles horribles, la guerra de Crimea supuso un punto de inflexión en la medicina militar.

La obsesión de Nightingale por la estadística empezó por su vivo interés por la botánica. Mientras realizaba un trabajo de clasificación de las plantas, se encontró con una ley estadística que estimuló su curiosidad y le llevó a establecer una duradera amistad con su creador. Se trataba de la ley de Quetelet sobre el florecimiento de la lila común. Espero que todo esto haya sembrado un par de ideas provechosas.

Fractales

Por doquier

HOW NATURE WORKS: THE SCIENCE OF SELF-ORGANIZED CRITICALITY, por Per Bak. Springer Verlag; Nueva York, 1996.

Hace ya diez años apareció publicado un artículo en *Physical Review Letters* que tuvo un enorme impacto más allá del dominio de la física. Este artículo, firmado por Per Bak, y sus entonces colaboradores Chao Tang y Kurt Wiesenfeld, intentaba proporcionar una explicación simple y coherente del llamado "ruido 1/f" y, de forma más general aún, de la presencia de fractales en la naturaleza. Los objetos fractales aparecen en situaciones dispares, que implican escalas espaciales y temporales muy distintas. Los ríos, las montañas, la distribución de galaxias, la diversidad en las selvas tropicales o la distribución de epicentros en los terremotos obedecen las leyes de la geometría fractal. De forma muy esquemática, decimos que estos objetos son fractales porque, observados a distintas escalas, ofrecen las mismas propiedades estadísticas. Se dice que son "invariantes bajo cambio de escala".

Una característica básica de estos fenómenos es la existencia de las leyes potenciales. Si x es la intensidad de un terremoto, se espera que ocurra con una probabilidad que depende del inverso de una potencia de x: la distribución de frecuencias de terremotos de intensidad x decae según esta ley. Puede probarse que éstas son las únicas leyes que verifican invariancia bajo cambio de escala. El libro de Bak empieza con la idea de complejidad y la existencia de leyes potenciales. Es muy notable, nos indica, que fenómenos tan dispares como las fluctuaciones de la economía, la luz emitida por los cuásares o la dinámica de las extinciones de las especies obedezcan el mismo tipo de fluctuaciones de tipo fractal. Una posible explicación de dicha universalidad fue avanzada por Bak. La teoría fue bautizada como "criticalidad autoorganizada".



Existe una situación natural en la que la sibisemejaza y el ruido 1/f emergen de forma natural: las transiciones de fase críticas. Estas tienen lugar, por ejemplo, cuando enfriamos lentamente un fragmento de hierro caliente. Al alcanzar cierta temperatura crítica (la temperatura de Curie) el material presenta un cambio drástico en su comportamiento: por debajo del punto de Curie aparece magnetización espontánea (los átomos se han ordenado acoplando sus momentos magnéticos en la misma dirección) y justo en el punto de transición la magnetización presenta fluctuaciones fractales en el espacio y el tiempo.

Uno de los resultados más asombrosos de la teoría es la existencia de "universalidad": el comportamiento de un sistema en las proximidades del punto crítico depende de un número muy reducido de factores. Una consecuencia crucial de la universalidad es que podemos elegir el modelo más simple que preserve las propiedades clave descartando todos los detalles superfluos. Cabe preguntarse entonces si los fenómenos naturales que exhiben fractalidad son el resultado de transiciones críticas.

¿Cómo se alcanzan dichos puntos críticos? En el ejemplo anterior el experimentador ajusta externamente la temperatura, pero en la naturaleza nadie está cambiando los parámetros del sistema: ¿cómo, entonces, podemos alcanzar espontáneamente dichos puntos? Per Bak dio con una posible solución que se introduce con el ejemplo paradigmático del montón de arena. Cuando dejamos caer arena sobre una mesa, lentamente, vemos que se forma un montón de forma cónica cuya pendiente crece hasta alcanzar un valor constante (crítico) que no es posible superar. Una vez alcanzado el ángulo crítico, observamos que, con la caída de un grano de arena, muy a menudo se produce la caída de otro grano. Más raramente dos son arrastrados y la probabilidad de que x granos rueden pendiente abajo decae con rapidez. De vez en cuando, muy raramente, se dan acontecimientos catastróficos: un solo grano genera una avalancha del tamaño del montón.

RICARD V. SOLÉ

Ciencia milenaria

En árabe

ENCYCLOPEDIA OF THE HISTORY OF ARABIC SCIENCE. 3 vols. Dirigido por Roshdi Rashed. Routledge; Londres-Nueva York, 1996. **TRADE AND TRADERS IN MUSLIM SPAIN**, por Olivia Remie Constable; Cambridge University Press; Cambridge, 1994.

HISTORY OF ASTRONOMY. AN ENCYCLOPEDIA. Dirigido por John Lankford. Garland Publishing, Inc.; Nueva York, 1997. **FROM BAGHDAD TO BARCELONA. DE BAGDAD A BARCELONA**. Edición preparada por Josep Casulleras y Julio Samsó. Instituto "Millás Vallicrosa"; Barcelona, 1996. **ISLAMIC ASTRONOMY AND MEDIEVAL SPAIN**, por Julio Samsó. Variorum; Aldershot, 1994.

HEALTH AND MEDICINE IN EARLY MEDIEVAL SOUTHERN ITALY, por Patricia Skinner. Brill; Leiden, 1997. **KRANKHEIT UND GESUNDHEIT BEI MAIMONIDES (1138-1204)**, por Heinrich Schipperges. Springer; Heidelberg, 1996. **DAS REGIMEN SANITATIS KONRADS VON EICHSTÄTT**. Edición preparada por Christa Hagenmeyer. Franz Steiner Verlag; Stuttgart, 1995.

Desde que el hombre ilustrado cobró conciencia del legado intelectual de quienes le precedieron, la ciencia milenaria que habló árabe ocupó un puesto de honor. Poco a poco

fue desempolvándose cuanto a ella le deben la astronomía, matemática, óptica, medicina, música, botánica, agricultura e ingeniería posteriores. Inmenso saber ahora compendiado en una sobria *Encyclopedia of the History of Arabic Science*, tan exhaustiva cuan expurgada de disquisiciones puntillistas.

La ciencia árabe fue internacional en su nacimiento y en su proyección. Heredera del helenismo, incorporó la aportación del mundo mesooriental e hindú. Y, a diferencia de otros movimientos más o menos espontáneos, se instauró desde arriba, vale decir, fue deliberada la congregación de expertos profesionales y traductores, en su mayoría de confesión nestoriana, que prepararon una suerte de fondo bibliográfico del saber de su tiempo, puesto al alcance de un mundo en expansión —de Samarkanda a Granada— a través de su expresión en una sola lengua, el árabe. El idioma común facilitó el desarrollo de un doble fenómeno exclusivo de su sello, a saber, los viajes y la correspondencia científica. Se iba de un lugar a otro en busca del mejor maestro, y éste propagaba sus conocimientos de centro en centro. De Basora a El Cairo anduvo Ibn al-Haytham; allí arribó también, procedente de Córdoba, Maimónides. De Tus salió Sharaf al-Din al-Tusi camino de Damasco, pasando por Hamadhan, Mosul y Alepo.

Al impulsar el conocimiento, los califas buscaban sobre todo un fin práctico. Durante los siglos VIII y IX se van vertiendo los tratados geopónicos clásicos. Traducen y asimilan las *Georgika* de Demócrito (en realidad, de Bolos de Mendes), la *Synagogé* de Vindanios Anatolios de Berytos y las *Georgika* de Kasianos Bassos Scholasticos. Cala honda la siriaca *Agricultura Nabatea*. Bajo la influencia de dos fuentes griegas traducidas, el *De causis plantarum* de Teofrasto y la *Materia medica* de Dioscórides, la botánica se desgaja de la agricultura. Pero no de una forma tajante. Abu Hanifa al-Dinawari, que escribió su *Kitab al-nabat* (Libro de agricultura) por el mismo tiempo en que esos textos seculares se vertían, en torno al año 895, armoniza morfología y sistemática botánica con cánones de agricultura.

Para desarrollar la agricultura, los árabes idearon técnicas ingenieriles cuyas aplicaciones todavía perduran. Represaron cursos fluviales, tendieron acueductos y canalizaron la distribución del riego. Amén de idear ingenios diversos para elevar el agua. El tren de vida de las ciudades principales, como Bagdad, El Cairo o Córdoba, hubiera sido impensable sin una agricultura generosa a su vera. El califato abásida extendió la red de canales entre el Eufrates y el Tigris, prolongó el gran canal de Nahrawan, al este del Tigris, y añadió dos nuevos sistemas sobre los ríos Uzaym y Diyala. En *Yspania* se trabaja sobre la cuenca del Guadalquivir y el Levante, no muy distinto éste del relieve sirio, ya domeñado.

Mantener bajo una misma regla dominio tan extenso requería una estructura administrativa sólida. Para ayudar a instalarla, en el año 846 Ibn Khurdahbih compuso el *Libro de los caminos y reinos*. Además, de la delimitación de las fronteras y el trazado de caminos con sus postas, a la hacienda del califa le importaba que nadie quedara exento de tributación.

Trade and Traders in Muslim Spain explica por qué el Islam no era un mundo cerrado. Al-Andalus se integró en su cosmos en el año 711, cuando los musulmanes atravesaron el estrecho. Ocuparon buena parte de la península, que convirtieron en provincia occidental sometida al califa omeya de Damasco. Al ser destronados los omeyas por los abásidas, a mediados del siglo nono, y el centro neurálgico del poder económico, político y cultural pasar a Irak, al-Andalus quedó un tanto marginado. Pero no aislado. Los intereses de la Córdoba omeya se extendían, por el este, hasta Bizancio y, por el norte, hasta Aquisgrán.

Con Abd al-Rahman III la España musulmana asumió el protagonismo del comercio mediterráneo. La declaración de un califato andalusí vino acompañada de un declive contemporáneo (aunque no de la desaparición) del poder abásida de Irak y el apogeo de los fatimidas, dinastía chiíta que había tomado la decisión de crear un califato en Túnez. Durante los años veinte y treinta del 900, la armada omeya tomó varios puertos de la costa norteafricana, que servían de parapeto contra los fatimidas, se usaban de escala para los productos andalusíes y daban acceso a las regiones auríferas de Africa. Sin embargo, la dinastía omeya, corroídas sus entrañas por guerras civiles, se disolvió a comienzos del siglo XI en reinos de taifas. La caída de Toledo en manos cristianas, en 1085, precipitó la llegada de los almorávides.

Contemporáneamente, el auge de las ciudades-estado en el sur de Europa —Génova, Pisa, Venecia, Florencia, Marsella y Barcelona— promovió la aparición de nuevos focos de poder. Ayudados por los progresos militares del siglo XI y del XII, los mercaderes europeos comenzaron a abrirse camino entre mercados y rutas mediterráneos antes ocupados en exclusividad por musulmanes y judíos. Hasta comienzos del siglo XII la ribera septentrional del Mediterráneo fue privilegio del comercio costero cristiano, mientras que la meridional era coto musulmán. La península Ibérica era el único sitio, con Sicilia, donde mercaderes cristianos y árabes convergían.

Siguiendo la costa norteafricana, mercaderes árabes y judíos traían a *Yspania* productos de Oriente que trocaban por esclavos, ámbar, mercurio y seda andalusíes. Los barcos mercantes navegaban a la vela. Gruesos y de andar lento, evitaban salir en invierno. Utilizaban vela latina, triangular, aunque la cuadrada no se desconocía.

Europa recibirá bastante más que platos de cerámica, uno de los bienes andalusíes más preciados por los burgueses de Pisa. La ciencia europea que renace en el siglo XII se amamanta del saber astronómico y médico árabe. Abrase, por cualquier página y en lo concerniente a lo primero, la *History of Astronomy* de Lankford. Advertiremos, de entrada, su dilatada perduración, desde el siglo VIII hasta el XVIII, para caer muy pronto en la cuenta de algo más importante, su articulación vertebrada. Si irrelevante fue el peso de la tradición persa y siria en la conformación de la astronomía árabe, decisiva resultó la influencia india, la principal de las cuales sería el *Sindhind*, base de una vigorosa tradición musulmana que incluía las tablas de Muhammad ibn Musa al-Khwarizmi (fl. 813-833), autor asimismo clave de la historia del álgebra.

La astronomía india dejó paso, hacia finales del siglo nono, a la doctrina ptolemaica. Cuatro obras del alejandrino categorizaron el desarrollo de la astronomía del Islam: *Almagesto, Tablas manuales, Hipótesis planetarias* y *Tetrabiblos*. A ellos hemos de sumar los *Elementos* de Euclides. La astronomía ptolemaica, de expresión geométrica con sus orbes y círculos, estaba formalizada en leyes tomadas de la filosofía natural aristotélica que establecían el movimiento circular uniforme de los cielos y remitían a un Primer Motor, raíz última del movimiento. Los árabes agregarían la trigonometría, tabulando las seis funciones básicas.



Cuadrante solar del alcázar de Córdoba

Desde muy pronto, bajo el mecenazgo del califa al-Ma'mun, se realizaron observaciones que condujeron al refinamiento de los apartados capitales: oblicuidad de la eclíptica, precesión de los equinoccios, movimiento del apogeo solar, excentricidad solar y tamaño de la Tierra (patrón de referencia para medir el tamaño del universo). De los griegos heredaron esferas celestes y armilares, regla paraláctica y cuadrante mural. Los astrónomos musulmanes, tras refinar ésos, añadieron sextantes y otros, que instalaron en observatorios (Ulugh Beg y Maragha, por ejemplo).

Propósito de la astronomía árabe era entender la configuración (*hay'a*) del universo. Suponíase éste un *plenum* compuesto de nueve cuerpos contiguos, sólidos y esféricos, llamados orbes, concéntricos con una Tierra esférica inmóvil. La esfera de la Luna cerraba los cuatro niveles sublunares de los cuatro elementos: fuego, aire, agua y tierra. Cada órbita concéntrica presentaba incluida en su interior órbitas adicionales denominadas excéntricas y epiciclos.

Aunque divergían las opiniones sobre el movimiento seguido por los planetas, se admitía que resultaba de una combinación del movimiento propio de la órbita y el movimiento accidental resultante de su ubicación en el interior de otras órbitas. Todas las órbitas celestes constaban de un quinto elemento, el éter. A diferencia de los cuatro elementos sublunares, éste sólo podía acometer un movimiento uniforme de rotación.

Instados por los conflictos surgidos entre los valores de la precesión y la oblicuidad de la eclíptica que hallaban los observadores de Ma'mun y los datos de Ptolomeo, se propusieron varios modelos de "trepidación". Otro tipo de desazón tenía que ver con ciertos artificios que Ptolomeo había introducido en su *Almagesto*, como el ecuante, que violaba el principio de movimiento circular uniforme.

En la España musulmana, la tradición difería bastante de la oriental. Así aparece en *De Bagdad a Barcelona*, título del homenaje rendido a Juan Vernet, patriarca de los estudios de la historia de la astronomía en nuestra patria. Dicen los presentadores que el título lo sugirió Bernard R. Goldstein; podían haber añadido que remedando un trabajo clásico del año 30 de M. Meyerhof: *Von Alexandrien nach Bagdad. Ein Beitrag zur Geschichte des philosophischen un medizinischen Unterrichts bei den Arabern*. De más que mediano valor las colaboraciones de George Saliba, David Pingree, Bernard R. Goldstein y Richard Lorch, entre otros, me fijaré, sin embargo, en los ensayos de dos españoles que no pertenecen, *sensu stricto*, a la escuela barcelonesa, pero que le aportan el rigor de una formación científica. Me refiero al trabajo de Honorino Mielgo, hoy en la Universidad de León, y José Chabás, funcionario europeo en Bruselas.

Las colecciones de tablas astronómicas se llaman *zijes*. Además del movimiento medio y las tablas de ecuaciones, incluían tablas calendáricas o cronológicas, tablas trigonométricas o de astronomía esférica, listas geográficas con latitudes y longitudes, y posiciones de las estrellas fijas. En la España musulmana del siglo XI se confeccionaron las *tablas toledanas*. En el segundo tercio del siglo XIV las toledanas fueron sustituidas por las *tablas alfonsíes*, cuya vinculación con el Rey Sabio se ignora. Con las tablas se pretendía saber las posiciones del Sol, la Luna y los cinco planetas en una fecha determinada. Esencialmente, el proceso empezaba con las tablas de movimientos medios, que podrían emplearse junto con una posición de partida, o radix, para hallar cuánto se había alejado un planeta desde ese punto base. Las raíces venían dadas por la fecha de la Hégira. Tras determinar la posición media, el astrónomo procedería entonces a aplicar una serie de correcciones relacionadas con el movimiento no uniforme del Sol y los planetas y el fenómeno de la retrogradación de los últimos.

Mielgo expone un método de análisis para las tablas astronómicas del movimiento medio. Perfecciona el procedimiento presentado por E. S. Kennedy, que se funda en la extracción de un parámetro de cada entrada de la tabla con cuyos valores afinar la estimación, para luego recalcular la tabla con el parámetro inferido. El matemático leonés mejora el método con la introducción de intervalos, en vez de valores discretos, y la selección de los procedimientos de aproximación posibles. Por último, sistematiza en rutinas ese razonamiento para su automatización en un computador. Tras establecer la teoría, la ejemplifica en la tabla de Azarquiel de trepidación del movimiento medio.

El ensayo de Mielgo constituye también un modelo de exposición de un problema de historia de la ciencia. Parte de las definiciones de tipos de tablas y tipos de aproximación. Un conjunto de tablas de movimiento medio consta de tablas elementales que permiten, por mera adición, calcular el movimiento medio de un cuerpo celeste determinado para una fecha dada. Las tablas elementales dependen del calendario empleado; cuando son para los días del mes, los meses del año y los años de un período, las entradas de las tablas se obtienen mediante la multiplicación del valor del movimiento diario medio por el número de días correspondiente a la entrada considerada. Cuando las tablas sirven para computar períodos encierran mayor complejidad.

Chabás, por su parte, expone la expansión de la astronomía andalusí en Cataluña evidenciada en las *tablas de Barcelona*, en la línea que iniciara J. M. Millás Vallicrosa con *Las tablas astronómicas del Rey Don Pedro el Ceremonioso*. Chabás ha podido ojear nuevos manuscritos y contar con trabajos de medievalistas posteriores.

Tras el análisis de distintas tablas y la identificación de las fuentes, arriba a varias conclusiones de alcance general. La primera: las *tablas de Barcelona*, elaboradas por iniciativa del rey Pedro el Ceremonioso en la segunda mitad del siglo XIV, constituyen un conjunto completo de tablas astronómicas, acompañadas de un texto explicativo de su manejo, que sigue el modelo tradicional de los astrónomos andalusíes. Más en concreto, parece probada su dependencia de la obra del sevillano afincado en Córdoba Abu Yafar Ahmad ben Yusuf ibn al-Kammad. El judío Jacob Corsuno debió de ser el protagonista principal de la compilación de las *tablas*, según se desprende de la introducción de los cánones. Corsuno compuso en Sevilla un tratado sobre el astrolabio en árabe, que él mismo tradujo al hebreo en 1378 en Barcelona.

Ambos aspectos sectoriales de Mielgo y Chabás hallan cabal encuadre en la revisión general que Julio Samsó ha compuesto para presentar *Islamic Astronomy*, que le ha publicado la muy selecta colección "Variorum". Samsó ha formado tándem con Vernet a lo largo de los últimos treinta y tantos años, si bien con personal interés por la astronomía observada desde el prisma de las traducciones alfonsíes.

Samsó defiende que antes del reinado del emir Abd al-Rahman II (821-852), introductor de las tablas astronómicas en al-Andalus, pervivía la tradición astrológica latina, que coexistió, hasta la undécima centuria, con una tradición árabe de astronomía popular. La tradición latina identifica casas astrológicas con signos zodiacales y las predicciones se basan en las posiciones de los planetas. Se ignora la precesión de los equinoccios. Sin tablas, los astrónomos se sirvieron probablemente de reglas y diagramas que les permitían computar las longitudes planetarias medias. Tales cánones y diagramas están atestiguados en los tratados sobre *computus* y podrían haber constituido el origen de la escala zodiacal que aparece tras los astrolabios andalusíes y magrebíes.



Astrónomos árabes en su observatorio, según un manuscrito de principios del siglo XV. El que está de pie está midiendo la altitud de un cuerpo celeste con el astrolabio. Sus compañeros sentados completan la información cotejándola con los textos que tienen entre las manos

Un segundo ejemplo de una tradición astronómica latina nos viene dado por los relojes solares andalusíes: relojes horizontales donde la sombra solar de los solsticios describe dos arcos de hipérbola, mientras que en los equinoccios describe una línea recta.

Hacia mediados del siglo nono comenzó un período de *orientalización* de la cultura andalusí, proceso que persistió hasta la caída del califato omeya (1031). La pérdida de la unidad política supuso el comienzo de un período de cincuenta años, el de la maduración de la astronomía andalusí y el comienzo del desarrollo de sus rasgos distintivos de la mano de Abu Ishaq ibn al-Zarqalluh (m. 1100). Con Azarquiel, en efecto, parece arrancar la tradición andalusí de los astrolabios universales. Estos se proponían eliminar el principal defecto del astrolabio



Práctica pública de la uroscopia, ilustración procedente de una traducción al hebreo del Canon *de Avicena. Manuscrito del siglo* XV *conservado en la Universidad de Bolonia*

normal: al constituir el resultado de una proyección estereográfica de la esfera celeste sobre el plano del ecuador con el centro de proyección en el polo Sur, el horizonte aparece en ella como un arco de círculo y, por ende, en el astrolabio estándar se requiere una placa especial para cada latitud. Con los ecuatorios, otros instrumentos astronómicos andalusíes, se resolvían también problemas complicados de cómputo. En el campo estrictamente observacional, los técnicos andalusíes crearon la esfera armilar de Ibn al-Zarqalluh, y el anillo graduado de Jabir ibn Aflah (ca. 1150), que podía montarse sobre el plano del meridiano, sobre el del ecuador o sobre el de la eclíptica.

No sólo hubo una tradición latina en astronomía. También la hubo en medicina. A ella le ha consagrado Patricia Skinner su trabajo de grado, impreso con el título *Health and Medicine in Early Medieval Southern Italy*. Le interesa más la sociología de la medicina que los principios teóricos de la misma. Se ha servido de fuentes bibliográficas, de restos arqueológicos y de crónicas para exhumar la vida diaria, desde los alimentos que se consumían hasta las enfermedades sufridas, pasando por la escasez generalizada y la salud de las mujeres, para demostrar que en la Italia meridional no existió hiato entre el fin del mundo antiguo y la alta Edad Media. Conociendo esa línea de continuidad, viene a decir, entenderemos mejor el florecimiento de la escuela médica de Salerno de la segunda mitad del siglo XI.

Las obras de los autores médicos de la antigüedad clásica se habían conservado en los enclaves bizantinos de la península. Lo vemos corroborado en la lista redactada en el siglo nono sobre plantas útiles atribuidas al abad de Montecasino Bertarius y en un manuscrito de la *Materia medica* de Dioscórides, cien años después, perteneciente al mismo cenobio. Se traducen por entonces al latín resúmenes de la ciencia griega y helenista. En el siglo XI se vierte del árabe la propedéutica de Ioannitius.

El monasterio —de larga tradición copista— se asentó como centro productor de saber y destinatario de donaciones que enriquecían su biblioteca. Así, el preste Leo lega a Casino en el año 945 libros de Galeno, Hipócrates y Asclepio. Con el monasterio comparte la sinagoga idéntico afán. Shabbetai Donnolo de Oria escribió el *Libro de mezclas*, un herbario del siglo décimo con un centenar de prescripciones; se trata del texto médico eurohebreo más antiguo, donde se recogen recetas bizantinas y judías, reflejo del entorno donde vivía.

Así pues, para cuando aparecen las primeras referencias a Salerno, había ya en el Sur de Italia una larga historia de producción de textos médicos y de intercambio de conocimientos a través de monjes y viajeros. Una figura central en el desarrollo de un *corpus* latino de textos médicos en el sur de Italia pudo haber sido el obispo Alfanus de Salerno (fl. 1058-85), a quien se le atribuye un papel decisivo en la creación de una terminología médica latina en la traducción de *De natura hominis* de Nemesio. Esa terminología constituyó una precondición esencial para la recepción de la medicina árabe en la segunda mitad del siglo XI y el XII.

En el curso del siglo XII, la medicina de Salerno parece haber sido más teórica y más proclive hacia la educación académica y formal. La primacía en la tarea traductora que lo hizo posible debe concedérsele a Constantino el Africano (1010-1087). La proximidad de Salerno a Montecasino podría explicar por qué la mitad de las prescripciones del *Antidotarium salenitanum* se encuentran también en el libro X de la práctica del *Pantegni* de Constantino.

La medicina árabe que se traduce en Salerno llega a su plenitud en El Cairo, siglo y pico después gracias a la actividad desplegada por un judío español nacido en 1138. Procedía de Córdoba, la que el califa al-Mansur había convertido en emporio del saber y tolerancia con una biblioteca de 400.000 volúmenes y población de 3000 estudiantes. Duró poco ese esplendor. La muerte de Ibn Rushd, nuestro Averroes, en 1198, significó el fin del poderío intelectual de al-Andalus. Su discípulo Abu Amram Musa b Ubaidallah b Ma'mun al-Qurtubi, Maimónides, uno de los principales filósofos judíos, tuvo que huir de la persecución de los almohades. En lo que quizá ha sido un acto testamentario, Schipperges nos ha legado una magnífica introducción a la medicina hispanoárabe a través de la enfermedad y la salud según nuestro compatriota (*Krankheit und Gesundheit bei Maimonides*).

Maimónides debió de aprender las primeras nociones médicas en Córdoba. El destierro le llevó a Almería, donde pudo beneficiarse de la amistad con el médico Jona ibn Biklarish. Un conocimiento más sistemático lo alcanzó en Fez; allí conoció al hijo de Avenzoar. Pero, a la postre, su formación parece ser autodidacta. Más cercano a Galeno que a Hipócrates, leyó las traducciones de Hunain ibn Ishaq y las obras originales de al-Farabi, ar-Razi, Ibn Sina y demás "mauritanos", según denominaban los renacentistas a los médicos musulmanes.

De su obra se desprende una dependencia inteligente y crítica de la tradición grecoárabe. Pero con esa afirmación no abarcamos a Maimónides. En la onda de Galeno, supo maridar filosofía y medicina en la patología teórica, que él reputaba

inserta en una concepción teológica del hombre. De ahí la importancia de la enfermedad, complementaria de la salud y la felicidad, que sirve para acrisolar la entereza del paciente en la adversidad y cumplir su destino en el mundo. Por eso la historia hebrea lo reconoce como rabí Moshe, donde "rabí" no significa tanto una profesión cuanto la aceptación de un magisterio de doctrina y de vida. Entre sus obras encontramos comentarios y compendios de autores clásicos, escritos sobre enfermedades o condiciones particulares (asma, hemorroides, intoxicaciones y afrodisiacos), libros de dieta e higiene y listados de drogas.

De un tiempo a esta parte la historia se ha volcado con notable éxito hacia una de las extensiones más eficaces de la medicina árabe: la prevención terapéutica, que halló su género literario en los *regimina sanitatis* del siglo XIV. Fijaban éstos, avanzado el tardomedievo, las necesarias medidas higiénicas que las clases altas árabes habían refinado hasta el extremo. Por eso estaban dedicados los consejos a algún principal. Andando el tiempo, en Europa se democratizan un tanto los usos, hasta el punto de escribirse en lengua vernácula las prescripciones. Exponente de ese tránsito es el *Das Regimen Sanitatis Konrads von Eichstätt*.

Christa Hagenmeyer, que ha preparado la edición crítica latina y alemana, pone en claro el complejo origen de las dos versiones en que nos ha llegado la obra. Justifica filiaciones, así cuando compara textos de Konrad con otros de Averroes o Avicena, y revela los avatares de la versión larga y la versión corta (ésta una suerte de vademécum para la vida diaria del burgués emergente) a lo largo de los siglos XV y XVI.

Konrad nació en las postrimerías del siglo XIII y estudió probablemente en Francia e Italia. En las universidades del sur de Europa conoció la *Isagoge* de Ioannitius, donde la medicina se organiza según tres niveles de realidad. En primer lugar, las *res* (cosas) *naturales* (entidades constitutivas del individuo: humores, elementos, cualidades y complexiones), *res praeter naturam* (entidades atentatorias contra la vida y la salud: enfermedades, sus causas y síntomas) y *res non naturales* (cuanto el cuerpo necesita para su bienestar). De estas últimas se distinguían seis grupos: 1) aire, ambiente y clima; 2) comida y bebida; 3) sueño y vigilia; 4) movimiento y reposo; 5) evacuación y repleción; 6) movimientos y afecciones del alma. Para hacernos una idea sumaria del tenor del contenido, citemos, por ejemplo, que a propósito del baño Konrad recomienda tres precauciones: que se realice después de la digestión, tras la evacuación y luego de una pequeño paseo o ejercicio.

LUIS ALONSO

Química de la vida diaria

En la cocina

EL SECRETO DE LOS PUCHEROS, por Hervé This. Acribia; Zaragoza, 1996.

Las actividades de los técnicos de los alimentos están mediatizadas ya que, en último extremo, todos los esfuerzos realizados para hacer llegar los alimentos en las mejores condiciones a la cocina quedan a merced de quien actúa al transformarlos en manjares. La técnica culinaria, la base científica de este quehacer, es un gran reto sin resolver; la realización de las recetas, que se basa en la experiencia práctica, carece de un claro soporte científico que explique las razones de muchos de los "trucos" de los cocineros, que normalmente sólo poseen conocimientos empíricos y carecen de la base científica que les permita actuar en sintonía con los especialistas. En consecuencia, existe una separación considerable entre dos tipos de profesionales, condenados a entenderse, que hace difícil la necesaria comunicación entre ellos.

El profesor Hervé This en su libro *Los secretos de los pucheros* contribuye a cubrir este vacío en el conocimiento mutuo. En palabras del propio autor: "En este libro pretendo compartir con el lector las explicaciones científicas de las reglas de cocinado transmitidas de chef a chef y de madres a hijas." De este planteamiento se deduce que está dirigido a quien sienta curiosidad por conocer muchas de las razones de los procedimientos de cocinado; pretende ser, por tanto, un libro de técnica culinaria y puede considerarse que, en términos generales, el objetivo se cubre. Además, aporta una descriptiva práctica de los procedimientos culinarios valiosa para los científicos al conseguir una mejor comprensión de lo que se hace con los productos que ellos han conservado o transformado en las industrias.

La estructura del libro, mediante preguntas y respuestas, que en muchos casos quedan como incógnitas por resolver, es propia de un libro de divulgación. La mejora de su débil organización estructurada y coherente, sin reiteraciones innecesarias, hubiera supuesto un valor añadido nada despreciable.

Resultan muy atractivas las explicaciones sobre muchos de los procesos que tienen lugar en los alimentos durante el cocinado, fundamentalmente aquellos ligados a los fenómenos físico-químicos de ósmosis y su influencia en la formación de caldos y en las pérdidas de jugos en los cocinados, los mecanismos de transferencia de calor en distintas circunstancias, los distintos efectos de la forma de aplicación del calor, los conceptos de viscosidad en muchas actividades culinarias, etcétera.

No obstante, en un libro con una pretensión de divulgación científica para no entendidos, se encuentran algunos problemas achacables a la formación propia del autor, que a pesar de su buen hacer en muchos temas, en los que desciende hasta un nivel mínimo, pasa sin más a explicar algunos procesos, como por ejemplo el ablandamiento de las verduras, sin aclarar qué son la hemicelulosa y la peptina.

También se le podría reprochar la sensación de frustración que se siente al comprobar que algunas de las preguntas no se respondan en los términos planteados. A título de ejemplo, ante la posibilidad de saber "cómo evitar que se salga la leche", sólo acabamos enterándonos de "por qué se sale" (se podría haber formulado así la pregunta). También cabe pensar que los lectores a quienes se dirige el autor que no tengan una clara mentalidad científica, consideren excesivas las preguntas que quedan por resolver. Este último aspecto, por otro lado, puede resultar altamente sugerente a los expertos en alimentación, que pueden encontrar en estas cuestiones no resueltas nuevas líneas de trabajo.

Un valor añadido del libro es su fácil lectura y, al ser un libro traducido, este valor hay que atribuirlo a la traductora, que ha realizado un magnífico trabajo, no siempre adecuadamente reconocido.

FRANCISCO LEÓN CRESPO

William S. Rainey

Escalas salmoneras

Un solo obstáculo hecho por la mano del hombre puede exterminar toda la fauna de peces migratorios que se aprestan a remontar un río. Basta levantar un dique no más alto que un metro o dos para impedir el acceso de los salmones a sus zonas de desove tradicionales y eliminar todo rastro de la especie aguas arriba.

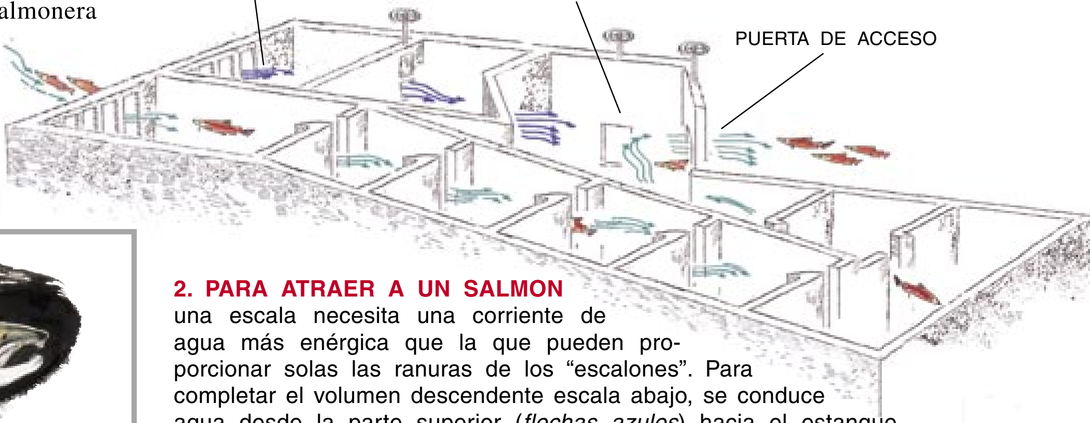
Los salmones, recurso alimentario histórico, ya están recibiendo auxilio. Se les ha subido curso arriba merced a esclusas salmoneras, se les ha cargado en cisternas que camiones trasladaban a sitios más altos y, lo más eficaz, se les proporcionan pasos o escalas que salvan las presas con unos escalones que los peces pueden superar.

Las primeras escalas salmoneras consistían en estanques separados por obstáculos que los peces podían vencer, estando cada estanque del orden de treinta centímetros más alto que el precedente. Pero a veces la corriente en la escala era insuficiente para atraer a los peces. En otros casos, una corriente excesiva impedía que subieran escala arriba y salvaran la presa.

En un tipo de escala salmonera contemporánea se abren ranuras de 30 a 40 centímetros de ancho en los tabiques que separan los estanques, de 120 a 240 cm de profundidad, y se consiguen así unas corrientes de condiciones favorables a los peces. Además, los estanques disipan la energía cinética de la corriente y proporcionan zonas de descanso, con lo que los peces pueden nadar sin fatiga de un estanque a otro.

Estudios por seguimiento radioeléctrico demuestran que una escala salmonera bien diseñada puede convertir una represa letal para los peces en una instalación casi inocua en lo que respecta a la migración aguas arriba. Por desgracia, la otra mitad de la cuestión sigue presentando inconvenientes. La pequeña corriente de la escala no seduce a los más jóvenes que remontan el curso y pueden sufrir la atracción de las turbinas o el acecho de los canales de riego; para evitarlo se instalan cedazos que les privan el paso.

1. UNA ESCALA PARA PECES, o escala salmonera, acostumbra ser un canal abierto, cuya pendiente es del diez por ciento, compartimentado con tabiques verticales ranurados. El máximo desnivel de treinta centímetros entre la altura del agua de un compartimento a otro genera una corriente que instintivamente buscan los salmones. Disponiendo las ranuras en oblicuo se encauza la corriente hacia el estanque de detrás de cada tabique, con lo que el agua descendente nunca lleva una energía superior a la que un salmón puede resistir. Las diferencias entre los niveles del agua no interrumpen la escala. El agua más alta aumenta la corriente que pasa por las ranuras y también la masa de agua para absorber energía contenida en cada estanque.



2. PARA ATRAER A UN SALMON una escala necesita una corriente de agua más enérgica que la que pueden proporcionar solas las ranuras de los “escalones”. Para completar el volumen descendente escala abajo, se conduce agua desde la parte superior (*flechas azules*) hacia el estanque inferior (el de entrada) produciendo así una corriente más rápida en la puerta de acceso. Los ingenieros sitúan la puerta allá donde los salmones tienden a congregarse.



SALMON ROJO

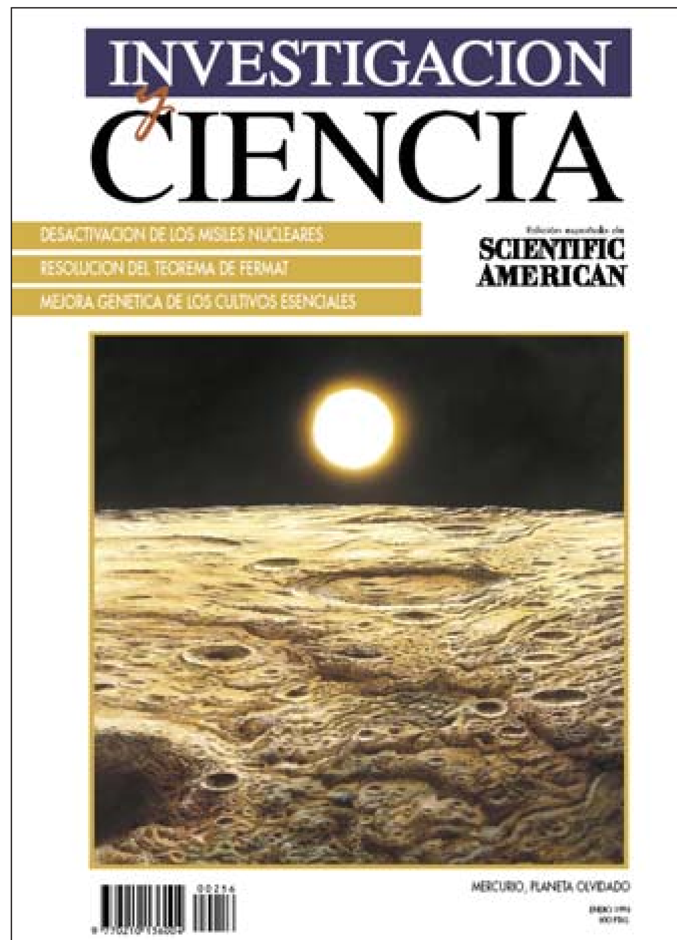
INDICE ANUAL

Este índice contiene los títulos de los artículos y los nombres de los autores aparecidos en Investigación y Ciencia *a partir de enero de 1997.*

TITULOS

AUTORES

Seguiremos explorando los campos del conocimiento



COMO ELIMINAR EL RIESGO DE LAS ARMAS NUCLEARES, por Bruce G. Blair, Harold A. Feiveson y Frank N. von Hippel

Ya es momento de acabar con la práctica de mantener los misiles nucleares siempre listos para ser disparados al instante. De hacerlo se reduciría enormemente la posibilidad de un lanzamiento por error.

EL ULTIMO REDUCTO DE FERMAT, por Simon Singh y Kenneth A. Ribet

Su teorema más notable tuvo desconcertadas durante más de tres siglos a las más grandes inteligencias. Pero, tras diez años de trabajo, un matemático ha conseguido desentrañarlo.

EL ARMA SECRETA DE LAS AVISPAS PARASITAS, por Nancy E. Beckage

Las avispas parásitas han de desarrollarse dentro de orugas vivas. Para sobrevivir en este ambiente hostil utilizan un virus que neutraliza el sistema inmunitario del hospedador.

ANTIGENOS ESPECIFICOS DEL SEXO, por Antonio Sánchez Rafael Jiménez, Miguel Burgos y Rafael Díaz de la Guardia

Considerados antaño responsables de promover la diferenciación testicular embrionaria, su verdadera función y modo de actuación están aún por dilucidar.

GUERRA AL VIRUS INFORMATICO, por Jeffrey O. Kephart, Gregory B. Sorkin, David M. Chess y Steve R. White

Las metáforas biológicas nos permiten intuir muchos aspectos de los virus de ordenador y sugerir estrategias defensivas.

LA GRAN ZIMBABWE, por Webber Ndoro

Esta antigua ciudad de los shona fue durante siglos el centro de una vasta red comercial. Sus ruinas han sido también centro de un intenso debate sobre la historia de Africa y su legado cultural.

ARROZ RESISTENTE A ENFERMEDADES, por Pamela C. Ronald

Por primera vez, los científicos han utilizado ingeniería genética para proteger de enfermedades este cultivo esencial.

MERCURIO, PLANETA OLVIDADO, por Robert M. Nelson

Pese a ser uno de los vecinos más cercanos a la Tierra, ese mundo lleno de extrañeza permanece en buena medida desconocido para nosotros.

INVESTIGACION y CIENCIA